



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

지리학석사 학위논문

서울시 침수피해지역의 분포와 원인규명

2018년 8월

서울대학교 대학원

지리학과

박 지 수

서울시 침수피해지역의 분포와 원인규명

지도교수 박 수 진

이 논문을 지리학석사 학위논문으로 제출함
2018년 8월

서울대학교 대학원
지리학과
박 지 수

박지수의 석사 학위논문을 인준함
2018년 7월

위 원 장 박 정 재 (인)

부위원장 김 대 현 (인)

위 원 박 수 진 (인)

국문초록

이 연구의 목적은 2010년부터 2014년까지의 서울시 침수피해에 영향을 미치는 요인을 분석하는 것이다. 본 연구는 요인분석(factor analysis)을 통해 요인들의 특징을 파악하여 홍수 영향 요인을 도출하였다. 5개의 요인이 도출됐으며, 도출된 요인들의 분포를 확인했고 침수 피해정도를 결정할 영향인자를 알아보았다. 주요 영향인자는 유수인자, 기상인자, 생태인자로 도출되었다. 이렇게 요인분석으로 도출된 요인들은 포아송 회귀분석(Poisson regression)을 통해 침수 피해에 영향을 미치는 변수 중요도를 알아보았다. 그 결과, 유수인자가 가장 높은 영향력을 보였다. 이 요인이 분포되어 있는 지역들은 지형의 기복이 크고 물이 흘러들어가 잘 모이는 지역일 가능성이 크다. 특히, 유역지역, 하천변에서 홍수피해가 클 것으로 추측된다. 이들의 분포를 확인하였을 때, 물이 모이는 지역이 서울 곳곳에 존재하였다. 따라서 이런 지역에 대한 배수와 유수 확보가 필요하다. 특히, 유역과 하천의 관계를 파악하여 유역별 관리가 이루어져야 하며 이에 대한 추가적인 연구가 진행될 필요가 있다.

주요어 : 도시홍수, 침수피해, 요인분석, 포아송 회귀분석, 서울시
학 번 : 2015-22547

목 차

제 1 장 서론	1
제 1 절 연구배경	1
제 2 절 연구목적	5
제 2 장 선행연구	7
제 1 절 도시홍수의 연구	7
제 2 절 도시홍수 영향 인자 산정	9
제 3 장 연구지역 및 방법	13
제 1 절 연구지역	13
제 2 절 연구자료	15
3.2.1 자료 검증	23
제 3 절 연구방법	25
제 4 장 침수피해지의 분포와 요인 해석	30
제 1 절 침수피해지역의 분포특성	30
4.1.1 침수피해 현황	30
4.1.2 서울시 침수 공간 분석	36
제 2 절 침수발생의 자연·환경적 요인 분석	41
4.2.1 서울시 침수 영향인자	41
4.2.2 서울시 침수 요인에 대한 요인분석	44
4.2.3 서울시 침수 영향 요인별 분포	47
제 3 절 서울시 침수 영향 분석	55
4.3.1 회귀분석을 통한 침수 분석	55

제 4 절 침수 저감을 위한 정책적 시사점	57
제 5 장 요약 및 결론	61
참고문헌	63
Abstract	68

표 목 차

[표 1 분석에 사용된 자료와 그 의미]	22
[표 2 요인별 정규성 검증]	24
[표 3 침수피해 영향요인 회귀분석 결과]	43
[표 4 서울시 침수발생인자에 대한 요인분석의 결과]	47
[표 5 잠재변수를 활용한 포아송 회귀분석 결과]	56

그 립 목 차

[그림 1 연구지역 위치]	13
[그림 2 지오코딩 된 연도별 침수 발생지]	16
[그림 3 서울시 고도]	17
[그림 4 서울시 경사도]	17
[그림 5 서울시 사면유역지수]	18
[그림 6 서울시 습윤지수]	18
[그림 7 서울시 곡률]	18
[그림 8 서울시 지형특성지수]	18
[그림 9 서울시 토양도]	19
[그림 10 서울시 녹지율]	19
[그림 11 서울시 하천]	20
[그림 12 평균 강수량(2010-2014년)]	20
[그림 13 서울시 한시간 최대 강우 강수량]	20
[그림 14 서울시 불투수율]	21

[그림 15 서울시 토지피복도]	21
[그림 16 침수빈도]	24
[그림 17 고도]	24
[그림 18 TCI]	24
[그림 19 불투수면]	24
[그림 20 경사도]	24
[그림 21 사면곡면률]	24
[그림 22 사면유역지수]	24
[그림 23 녹지율]	24
[그림 24 습윤지수]	24
[그림 25 발생빈도에 대한 포아송 분포]	25
[그림 26 2010년 침수피해 현황]	31
[그림 27 2011년 침수피해 현황]	32
[그림 28 2012년 침수피해 현황]	33
[그림 29 2013년 침수피해 현황]	34
[그림 30 2014년 침수피해 현황]	35
[그림 31 세미베리오그램 결과]	37
[그림 32 K-함수 결과]	38
[그림 33 서울시 침수피해 밀도]	39
[그림 34 회귀모형에서 각 변수의 중요도]	44
[그림 35 고유값을 활용한 최적의 요인 수]	46
[그림 36 유속인자의 분포]	49
[그림 37 기상인자의 분포]	50
[그림 38 유수인자의 분포]	52
[그림 39 유량인자의 분포]	53
[그림 40 자연인자의 분포]	54
[그림 41 회귀모형에서 각 변수의 중요도]	57

[그림 42 토지피복도별 중요도]	60
--------------------------	----

1. 서론

1.1. 연구배경

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 제5차 평가보고서(2014)에 따르면 산업화, 도시화에 따른 온실가스 배출량은 계속 증가해 왔으며, 2000-2010년의 온실가스 배출량은 역사상 가장 많았다. 이러한 온실가스의 증가는 전 지구적으로 기온을 2.3℃ 상승하게 만들었고, 2050년까지 16.4℃에 이를 전망이다. 한국 평균 기온은 전 세계 평균 기온(0.6℃)보다 높은 약 1.5℃ 상승하였고 계속 상승할 것으로 전망된다(IPCC, 2007). 각종 GCM(Global Circulation Model)에 의한 기후변화 예측결과를 보면 앞으로 한국의 기온은 약 4℃ 더 상승할 것으로 전망되고 있다(운용남, 2009).

이러한 전 지구적인 온난화로 다수의 극한 기상 및 기후 현상에 따른 극지방의 해빙, 저지대 해수면 상승, 강수량 증가 등 다양한 수문요소들의 변화가 관측되었다(고태규·이원영, 2012c). 특히, 강수량의 변화는 일정하지 않을 것으로 나타났다. 전 지구의 평균 강수량은 약 3.2% 증가할 것으로 전망된다(강정은·이명진, 2012). IPCC(2014)의 RCP8.5¹⁾ 시나리오 산출결과, 고위도와 중위도 대륙 및 아열대 습윤 지역에서는 극한 강수 현상의 빈도 및 강도가 증가할 가능성이 매우 높다고 밝혔다. 특히 동아시아 지역은 지구온난화에 의해 대기 중 수증기 증가와 해양에서 대륙으로의 수증기 수송이 강화되는 것에 비롯되어 강수량은 전반적으로 증가할 것으로 예상된다(기상청, 2012). 한반도의 경우 강수량 경향은 증

1) IPCC 5차보고서에서 나온 온실가스 시나리오(RCP)로 온실가스 농도값을 설정 후 기후변화 시나리오를 산출하여 그 결과를 통해 배출 저감 정책을 결정한다. RCP8.5란 온실가스 시나리오 중 하나로 현재 추세(저감없이)로 온실가스가 940ppm에 도달하는 경우의 시나리오를 의미한다(기상청, 2012).

가할 것으로 예상되며, 내륙지역의 강수량은 지역별 편차가 클 것으로 전망된다.

기상청(2012)에서 제시하는 기후변화 보고서에는 한반도의 미래 강수량과 강수강도, 호우일수 증가를 전망하고 있다. 한국의 최근 20년간 강수량은 7% 증가하였으며 일 150mm이상 호우일수가 약 2배로 증가하였다. 또한 여름철 호우재해의 발생빈도가 연평균 5.3회에서 8.8회로 증가하였다(국립기상연구원, 2007). 이러한 강수현상의 변화는 수문시스템에 영향을 미치며 폭풍해일, 국지성 호우, 홍수와 같은 물 관련 재해를 증가시킨다(운용남, 2009). 우리나라는 유독 수해가 많이 일어났는데 이는 미래에 물 관련재해의 증가와 더불어 그 규모가 대형화 추세에 있음을 가리고 있다.

우리나라의 20년(1992-2011년)간 자연재해별 피해액 통계에 따르면 호우 및 태풍 등 집중강우에 의한 홍수 피해액이 전체 피해액에서 92%를 차지한다고 소방방재청(2012)에서 밝힌바 있다. 재산상의 피해뿐만 아니라 인명 피해의 측면에서도 높은 비중을 차지하고 있다. 지난 20년 동안 호우와 태풍에 의한 사망자수가 전체의 90%로 다른 자연재해에 의한 인명피해보다 압도적으로 높은 비율을 차지하고 있어 집중강우로 인한 홍수가 우리나라의 주된 재해임을 확인할 수 있다(행정자치부, 2002; 소방방재청(2012)에서 재인용).

우리나라는 도시화가 진행되면서 재난 및 재해의 파급영향이 커지는 양상을 보인다. 특히 서울은 도시화가 가장 많이 진행된 지역이기 때문에 인구밀도와 토지이용변화가 더욱 높을 수밖에 없다. 서울은 급격하고 빠른 도시화 과정을 거치면서 재해 방지에 대해서는 등한시되었다(최충익, 2004). 부실한 서울의 빗물처리 인프라와 98년 환경부 시설기준에 따른 서울시 하수도 처리용량기준은 돌발성 집중호우가 급증하는 추세인 현재를 따라가지 못하고 있다(최충익, 2013).

2000년대 이후 서울의 수해양상은 이상 기상현상으로 강우의 패턴이 국지적으로 바뀌고 있으며, 게릴라성 호우가 증가하는 등 서울의 수해양상이 매우 바뀌었다고 볼 수 있다(최충익, 2013). 기상청(2012)에 따르면

우리나라 여름철 평균 강수량은 1980년대 700mm를 밑돌았으나 지난 2000년대 들어 750mm 이상, 2011년에는 1000mm가 넘는 비가 내렸다. 시간당 30mm 이상의 집중호우성 강수의 발생 빈도가 1980년대에 비해 2000년대 들어 약 30% 증가했다(신상영, 2011). 특히, 국지성 호우가 두드러지는 강우양상을 보인다. 2011년 7월의 경우 같은 시간대에 서울의 관악구가 107.0mm로 노원구의 3.5mm와 강수량 차이가 무려 30배 이상 차이가 나 짧은 시간에 많은 양의 국지성 호우로 인한 침수를 비롯한 재해 가능성이 매년 증가하고 있다(유병학, 2012).

일반적으로 재해위험 가능성이 있는 강우(시간당 30mm 이상)는 지난 50년간 연평균 3.4회이며, 총 158회 발생하였다(신상영, 2011). 1998년에 시간당 30mm 강우 발생빈도가 14회로 가장 높았으며, 1962~1971년에 36회에서 2002~2011년에 41회로 5회 증가하였다(신상영, 2011).

이렇듯 강우사상별 강우 집중 발생지역과 규모가 일정하지 않은 상황에서 도시의 취약성은 더욱 심각해지고 있다. 기후변화로 인한 재해를 다루는데 있어 도시라는 공간은 중요한 의미를 가진다.(KEI, 2013). 도시의 특성상 많은 인구, 재산, 인프라가 집중되어 있어 재해에 매우 취약하다. 인구에 비해 공간이 협소한 서울과 같은 도시지역은 하천변 저지대가 개발되어 있다(이상은 외, 2016). 이는 입지적으로 우수배제의 어려움을 갖고 있으며, 노후 및 지하 건축물, 불투수면적의 증가, 배수시설 용량 부족 등 재난에 취약한 요인들을 가지고 있다(최충익, 2004). 과거 1970~1980년대 하천변 저지대 지역의 택지, 상가 등의 집중 개발로 현재 지하주택 35만 가구 중 약 4만가구가 침수 취약지역에 위치하고 있다(국토연구원, 2008). 도시화나 개발활동은 해당지역을 비롯한 인근지역에 수문학적인 부담을 줄 수 있으며(강상준(2012)에서 재인용) 침수피해에 더욱 노출될 수 있다.

또한 도시는 토지가 개발되는 과정에서 자연환경이 인공물로 채워져 자연재해의 90%가 홍수, 호우, 태풍 등 주로 물에 기인하는 우리나라의 경우 침수에 더욱 취약하다(최충익, 2003). 도심지역의 자연지반 상실로 침투·저류 할 수 있는 녹지공간은 줄어들고, 불투수포장 등이 늘어남에

따라 배수처리시설 과부하를 초래하고 있다. 서울시의 불투수면은 1962년에 7.8%였던 지역이 2010년에 47.7%로 증가하였으며, 불투수면 증가에 비례하여 표면유출량도 1962년에 11%, 2010년에 49%로 급증하였다(신상영, 2011).

서울시는 침수피해 방지를 위해 빗물펌프장이나 배수시설 유지관리를 이어오고 있으나(고태규, 2012) 기상이변으로 집중호우 및 태풍발생 등으로 인한 피해가 점점 증가하고 있다. 또한 도시 내에서 동일한 강우량이 내려도 장소에 따라 침수피해의 차이가 보이는데, 시설미비 혹은 시설용량 부족 등의 문제점을 개선했음에도 동일한 피해가 반복된다. 이런 현상은 지형적 여건이 좌우하는 것처럼 보여 진다(최충익, 2013). 침수피해의 원인이 복합적이긴 하지만 지역적 여건에 따라 피해원인의 기여도나 요인 관계에 차이가 있다(신상영 등, 2014). 전 국토의 70% 이상이 산지로 구성된 지형적 요인 때문에 집중호우 시 하류의 인구와 기반 시설이 밀집되어 있는 도시지역으로 유출량이 급속히 증가되어 피해가 발생하기도 하며(이상은, 2016) 단순히 불투수면의 증가로 설계 강우를 초과하고 침수피해를 발생시키기도 한다(신상영 등, 2014).

자연유역과는 달리 사회경제적으로 활동이 이루어지기 때문에 특성상 침수에 많은 피해 입을 수 있는 잠재력을 가지고 있다. 이에 강우라는 요인 외에 여러 요인을 고려할 필요가 있음을 알 수 있다(윤중식 등, 2013). 따라서 수해피해 분석에 있어 수해지역의 공간에 대한 분석을 반드시 고려되어야 한다(강상준, 2012). 실제 도시 공간 내에서 어떠한 요소들이 침수피해에 영향을 미치는지 알아보고 피해를 최소화하기 위해 침수 영향인자들을 분석할 필요가 있다.

본 연구는 서울시 지역에 대한 수해특성을 분석해 봄으로서 어떠한 요소가 도시의 침수피해에 영향을 주었는지 살펴보았다. 수해와 같은 자연재해피해는 인간과 자연이 만들어낸 종합적 현상이라는 점에서 자연적 요인, 인위적 요인 모두 고려하여 연구되어야 한다(최충익, 2004). 이를 토대로 서울시 수해지와 그에 영향을 주는 요인들로 이루어진 함수를 설정하였고 어떠한 요인들이 서울시 침수피해에 어떠한 영

향을 미쳤는지를 실증 분석하였다. 서울시의 침수 피해원인과 분포를 알아보고자 한다.

1.2. 연구목적

본 연구는 침수피해를 사전에 예방하기 위해서 침수가 어떠한 형태로 발생하는지 파악하고자 했다. 이에 서울시를 대상으로 침수 피해에 미치는 영향요인들을 파악하여 침수 원인을 밝히고자 한다. 2010년부터 2014년의 서울시 침수 이력을 활용하여 수해지의 분포와 그 특성을 파악하고 실제 침수 피해 발생에 미치는 요인들을 알아보고자 한다. 보다 구체적인 연구목적은 다음과 같다.

첫째로 서울시 침수피해지의 분포를 살펴본다. 수해지의 분포를 통해 서울시의 침수피해가 어느 지역에 밀집되어 있는지 알아본다. 침수 발생지의 분포는 인간 활동과 큰 관련성이 있기 때문에 군집형태의 강한 공간의존성을 갖는다(곽현빈 외, 2010). 따라서 공간의존성의 개념에 입각하여 점 데이터로 이루어진 서울시내에 수해지를 지도화시켜 분포와 패턴을 알아본다. 공간분포패턴을 분석은 커널(Kernl) 함수를 통해 침수발생의 밀집정도를 분석하였다. 침수피해가 주로 밀집되어 있는 지역을 알아보고 추려내어 그 특징을 자세히 살펴보았다.

두 번째로 서울시 침수를 구성하는 각각의 영향인자들이 어떠한 요인들과 연관되어 있는지 판단한다. 앞서 활용된 요인들 사용하여 요인분석을 실시하였다. 요인분석 후 도출된 잠재적변수와 그 결과 값을 지도화시켜보았다. 이를 통해 서울시내에 일어난 수해지에 영향을 주는 주요 요인을 알아볼 수 있으며 서울시가 가지고 있는 자연·환경적 취약성을 파악할 수 있다. 침수피해에 영향을 미치는 요인들은 문헌연구를 통해 선정하였고 GIS를 사용하여 분석하였다.

마지막으로 서울시의 침수피해 원인을 알아본다. 앞선 분석에서 취약성을 살펴보았다면, 이 분석에서는 실제로 최근 5년간 서울시에 영향을

주었던 주요 변수들을 살펴보았다. 분석에 활용한 변수들은 요인분석을 통해 나왔던 잠재변수들을 활용하여 분석하였다.

본 연구는 추후 집중강우에 따른 홍수피해를 최소화하는 방재계획을 수립하기 위해 기초 자료를 제공할 수 있다는 점에서 의의가 있다.

2. 선행연구

이 장에서는 서울시 침수 피해에 영향을 미치는 요인들을 알아보기 위해, 기존 도시 침수 연구들을 재검토하고, 연구의 의의와 한계점을 파악한다. 또한 선행연구에서 사용된 침수 영향인자들을 살펴보고 본 연구에서 활용될 영향인자를 선정하는데 있어 참고하여 분석에 적용하고자 하였다.

2.1. 도시 침수의 연구 경향

도시 홍수 피해발생과 관련된 연구는 주로 홍수 위험 요인 도출 혹은 취약성 평가, 홍수위험도, 홍수 모델링, 침수지 예측 등의 연구들이 진행되어오고 있다. 기존 관련 연구에서는 침수피해지역의 특성에 대한 통계적인 분석은 찾아보기 어렵고 침수이력과 지역특성을 고려하기 보단 홍수에 가장 취약한 지역을 알아보기 위해 인문학적, 자연적 요인을 활용한 통계분석이 주로 이루어졌다.

국외 연구를 살펴보면 홍수관련 지표와 세부지표 개발, 취약성 평가와 위험도 평가가 주로 이루어졌다. 특히 국제기구에서 홍수와 관련된 지표 및 지표 개발이 활발했다. 유엔환경계획(UNEP, 2000)에서는 인구밀도, GDP, 인류발전지수등과 같은 지표를 사용하여 취약지수를 개발했다. 유엔개발계획(UNDP, 2004)의 경우 홍수위험도의 객관적인 평가를 위해서 재해로 인해 발생할 수 있는 사망자 수를 바탕으로 DRI(Disaster Risk Index)를 개발 하였다. IPCC(2007) 4차 보고서에서 제시한 기후변화 취약성 평가에서는 취약성 지표를 노출, 민감도, 적응역량으로 분류해 부문별 지표를 도출하였다. 이 지표는 많은 취약성 연구의 지표로 활용되고 있다.

홍수위험도에 대한 연구를 살펴보면 영국의 환경식품농무부(DEFRA,

2006)에서는 과거의 홍수 침수심과 유속에 의해 발생한 사망자 수를 분석하여 위험도를 평가했으며, Bollin 외(2006; 강현웅(2015)에서 재인용)는 지역적 특성을 반영한 CBDRI(Community Based Disaster Risk Index)지표를 사용하여 위험도를 평가한바 있다. B.Jongman et al.(2012)은 7개의 모델링을 통해 과거 독일과 영국에서 일어났던 2건의 홍수 발생이력을 통해 유럽전역에 적용 할 수 있는 홍수 피해 위험 평가 기법을 제시하였다.

취약성평가는 기후변화의 위험성이 두드러지기 시작하면서 꾸준히 연구되어지고 있는 부문이다. 취약성 평가 연구는 미국, 유럽을 중심으로 1990년대부터 시작되었다. 취약성 평가 연구는 Flax et al.(2002)의 지역 사회의 평가 도구(Community Vulnerability Assessment Tool)연구로 병원, 소방서, 경찰서, 대표소와 같은 재난관리 기관과 통신, 교통, 상하수도과 같은 도시설비들의 취약성을 평가한바 있다. Bates와 De Roo(2000)의 연구에서는 래스터(raster) 자료를 활용하여 홍수 상황을 시뮬레이션해보고, 홍수 취약지의 특성에 대해 다루었다.

국내에서는 2000년대 이후부터 홍수취약성 평가에 대해 다수의 연구가 진행되어 지고 있다. 자치구 이하의 단위이거나 유역단위로 홍수취약성을 분석한 사례가 진행되고 있었다(정상희, 2004; 이병주, 2017). 도시적 토지이용의 변화가 도시의 토지이용의 증가와 자연재해 취약성에 대한 연구를 경기도를 사례로 한 연구가 있다(최충익, 2003). 취약성 방법론에 연구한 장옥재·김영오(2009)는 지역회귀분석을 수행하여 홍수취약성 평가를 시행하였다. IPCC(intergovernmental Panel on Climate Change)에서 제시한 기후변화 취약성 개념을 적용하여 변수들의 상관성 분석, 홍수 취약성 지역을 살펴보거나 강정은·이명진(2012), IPCC 취약성 모델에 기반을 두어 지표 도출한 후, 퍼지모형을 활용하여 홍수 취약성을 평가하고 GIS를 이용하여 취약성도 작성하였다. 성장현 등(2012)은 미래 서울지역의 홍수 취약성을 정량적으로 분석하기 위해 미래 확률 강우량을 선형 회귀식을 이용하여 통계적으로 전망하였다.

비공간적으로 접근하고 있는 정책적 연구에 비해 도시의 특성을 반영하고 있으나, 실제 홍수 피해 자료와 비교를 통한 검증단계가 필요한데 모델링의 적용, 취약성 평가에서 그치는 경우가 대부분이었다. 미국, 유럽을 중심으로 연구가 시작되었던 취약성 평가연구에서는 대표변수를 설정하는 있어 자연·환경적 요인과 사회적 중요성이 함께 고려되고 있으나 (Chakraborty et al., 2005) 국내 연구에서는 자연적 요인이 배제되거나 (장옥재·김영오, 2009) 기본적인 자연변수만을 활용하여 홍수 피해 특성을 연구한바 있다(김보경 등, 2011, 성장현 등, 2012).

도시홍수피해 영향인자에 관한 연구와 관련하여 Park et al.(2013)은 군집분석을 이용하여 서울시의 상습침수지역을 3가지 유형으로 분류하여 유형별 우선전략을 제시하였다. Kim et al.(2011)은 강우, 인문·사회, 경제, 홍수피해로 도시홍수피해 유발요인을 분류하였다. 요인분석 결과 강우요인은 24.68%, 인문·사회요인은 20.06%, 경제요인은 12.89%, 피해요인(침수면적)은 10.16%의 설명력을 지닌 것으로 나타났다. Jang and Kim(2009)은 홍수피해금액과 강우량 간의 비선형회귀분석을 통해서 계측지역 뿐만 아니라 과거 자료가 미약한 미계측 지역에서도 지역적 인자들을 통해 특정 빈도에 발생 가능한 홍수 피해금액을 추정한 바 있다. 이현중(2016)의 연구에서는 침수 피해 영향인자 분석을 통해 침수위험을 예측한 바 있다. 다수의 선행연구에서 침수 피해 영향인자 분석을 통한 침수피해지역 예측하거나 향후 침수피해액을 산정하는데 그치는 것을 확인 할 수 있었다.

2.2. 도시홍수에 영향을 미치는 요인 산정

본 연구에서는 침수 피해에 영향을 미치는 요인들을 선정하기 위해 관련 선행연구들을 고찰하였다. 특히 연구지역인 서울시의 자연·환경을 고려하여 침수피해에 영향을 미치는 요인들을 고려하였다. 도시지역의 홍수피해는 강우요인 외에도 자연적 요인, 토지이용들의 인자들과도 밀

접한 관련성이 있다(김지수 외, 2013). 침수피해에 영향을 미치는 요인은 거시적으로 보면, 강우조건, 지형 조건, 토지이용 조건, 배수시설조건 등으로 구분할 수 있으며 이러한 요인들의 상호작용이 침수피해로 이어진다(신상영, 2011).

침수피해에 영향을 미치는 요인의 강우조건으로 소방방재청(2011)의 연구에서 살펴보면 기상이변에 따른 집중호우가 근본적인 원인이지만 과도한 불투수율 증가와 저지대, 환경사지역 개발도 피해를 키우고 있어 지형, 토지여건을 고려해야한다. 기상적 요인과 관련하여 일반적으로 도시에서 홍수가 발생하였을 때 피해가 심화되는 원인으로는 국지성 집중호우의 증가와 하천변 저지대의 개발과 도시화로 인한 인구와 산업의 집중화, 방재시설의 용량 부족, 지하 공간 활용 증대 등을 들 수 있다. 성장현 등(2012)은 미래 서울지역의 홍수 취약정도를 정량적으로 분석하기 위해 미래 확률 강우량을 선형회귀식을 이용하여 통계적으로 전망하였다.

수해로 인해 지표면을 흐르는 유출에 영향을 미치는 요인으로서는 크기, 지형, 지질, 토양, 토지이용 등이 있으며 이 중 토양과 토지이용이 가장 중요한 요인이라 밝힌바 있다(김경하, 2003). 한편 지형조건에 있어 서울시의 상습침수지역을 살펴보면 저지대·저경사의 비율이 높고 녹지 및 공지가 상대적으로 적게 나타나고 있음을 알 수 있었다(이현종 등, 2016). 서울시는 하천 저습지에 시가지가 발달하는 특징이 있으며 시가지 개발에 있어 지형 조건은 오늘날까지도 지속적으로 영향을 준다(김동실, 2008). 하천 주변의 범람원과 하중도는 자주 침수되기 때문에 사람이 살기 어려운 지형적 조건이나 한강종합개발계획에 의해 한강 제방을 쌓고 공유 수면을 매립하면서 한강 주변의 범람원이 대규모 택지로 개발되었다(김동실, 2008). 따라서 저지대에 침수피해가 가중되고 있다. 저지대 지역은 하천홍수위 상승 시 배수불량으로 침수 위험성이 높고 현재 빗물펌프장과 같은 배수시설에 의존하는 지역이다(국토연구원, 2012). 또한 저지대이외에 가장 많이 언급되는 영향인자로 하천으로 부

터의 거리를 들 수 있다. 다수의 연구에서 외수침수의 주원인은 하천범람이며 침수피해가 발생한 주택은 대부분 하천변에 위치하였다는 점을 지적하였다(국토연구원, 2008). 하천변의 주거 및 상·공업시설의 밀집과 하천의 복개로 인한 도시지역의 불투수층 증가와 결합하여 홍수유출 증가를 유발하였다(고태규, 2012). 또한 연구마다 차이는 있으나 도시라는 지역적 특수성을 고려하여 토지이용, 불투수면적비율 등을 포함하였다. 도시화가 심화됨에 따라 저류기능이나 침투기능이 없는 불투수면적이 증가하면서 강수 유출에 의한 홍수도달 시간을 단축시키고 침투 유량을 증대시킴으로서 도시 하천의 치수 기능을 저하시키는 역할을 한다(최충익, 2003). 이에 대해 U.S. Nationwide Urban Runoff Program(NURP)을 사용하여 유역 내의 불투수면의 증가가 표면 유출량 상수(runoff coefficient)를 증가시킴을 밝혔으며 국내에서 탄천 유역을 대상으로 토지이용의 변화가 하천 유량에 유의미한 영향을 미침을 이미 입증한 바 있다(최충익, 2003).

선행연구는 주로 홍수 위험 요인 도출 혹은 취약성 평가, 홍수 모델링, 침수지 예측 등의 연구들이 진행됐으며, 홍수피해 영향요인에 관련된 연구는 영향요인들 활용하여 침수피해지역 예측하거나 향후 침수피해액을 산정하는데 그치는 것을 확인 할 수 있었다. 기존 관련 연구에서는 침수이력을 고려하여 침수원인을 규명하기 보단 홍수에 가장 취약한 지역을 알아보는 연구가 주를 이루었다. 취약성연구임에도 불구하고 자연요인을 배제하거나 고도, 경사도와 같은 기본적인 자연변수만을 활용하여 홍수피해 특성을 제대로 반영하지 못한바 있다. 한편, 과거 침수이력을 활용하고 있으나 일부 자치구에 연구지역이 한정되어 있거나 전국단위로 이루어져 있거나, 한 해의 침수 자료만을 활용하여 취약성을 분석한바 있다.

따라서 본 연구에서는 다양한 자연·환경적 요인도 함께 고려하고자 한다. 본 연구에서는 최근 5년간 서울시의 침수피해 자료를 활용하여 좀 더 향상된 설명력을 도출하고자 했다. 또한 수해와 관련된 연구가 주로 피해액에 중점을 두고 있으나 피해대상지가 가지고 있는 재산

가치에 큰 상관성을 가진다는 점에서 피해 빈도나 횟수에 대한 연구도 필요하다. 이에 본 연구의 분석과정에서 피해빈도를 종속변수로 사용하였다.

3. 연구지역 및 방법

3.1. 연구지역

본 연구의 공간적 범위는 서울시로 한정하였다. 인구는 약 9,857,426명으로 우리나라 인구의 19%가 서울에 집중되어 있다. 또한 정치, 경제 등의 도시기능이 밀집되어 있고 지하공간도 대규모로 복잡하게 이용되고 있다. 이러한 도시에 홍수피해가 발생하게 되면 피해액만이 아니라 복원에도 막대한 비용과 시간이 요구된다. 서울시의 2010년 9월과 2011년 7월 폭우로 대규모 침수피해가 발생하여 이에 대한 원인분석과 대책 수립이 비교적 체계적으로 이루어졌고, 침수자료 확보가 용이한 지역이다. 또한 지형학적으로 서울시가 산지 주변의 구릉지와 한강변을 비롯한 수변지역이 많아 홍수에 취약하다.

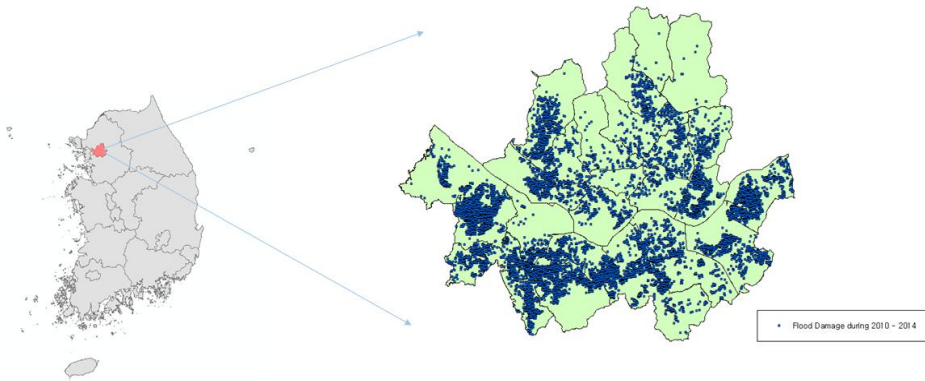


그림 1 연구지역 위치

1) 지형 특성

본 연구의 연구지역은 서울특별시로 북위 $37^{\circ}25'$ - $37^{\circ}41'$, 동경 $126^{\circ}45'$ - $127^{\circ}11'$ 에 위치해 있다. 한강 하류 분지에 입지한 서울은 산지, 구릉지, 곡지와 분지, 저습지 등 다양한 지형 요소로 구성되어 있다. 북쪽의 북한산과 도봉산, 수락산과 불암산이 남쪽에는 관악산, 청계산을

경계로 경기도와 구분되어 지며 이들 사이를 높고 낮은 구릉이 분포하고 있다(서울특별시, 2012; 김지수(2013)에서 재인용). 서울특별시에 속한 지역의 고도는 산지일대의 고도가 가장 높고, 한강 주변부가 가장 낮다.

서울시의 하천은 한강을 기준으로 주변 산지를 분수계로 하는 36개의 소하천으로 이뤄져있다. 제 1지류인 하천은 국가하천인 중랑천, 안양천과 함께 홍제천, 봉원천, 반포천, 탄천, 성내천, 고덕천 등 8개이며, 제2지류는 불광천, 청계천, 도봉천, 우이천, 시흥천, 양재천 등 16개이며, 제3지류는 녹번천, 정릉천, 성북천, 화계천 등 10개이며, 제4지류는 월곡천 1개이다. 서울시의 하천은 시가화가 진행됨에 따라 24개의 하천이 직강화 또는 복개되어 생활하수의 배제와 재해 시에는 우수의 조기배제 기능을 하고 있다.

2) 기후 특성

서울의 연평균기온은 12.5℃이다. 최한월 평균기온은 -2.4℃로 1월에 나타나고 최난월 평균기온은 25.7℃로 8월에 나타나며, 연교차는 28.1℃로 매우 크다. 서울시 26개소의 자동기상관측망에서 관찰한 기온은 도심지로 갈수록 기온이 높고 교외로 갈수록 낮으며, 특히 영등포, 양천 등 서부지역과 마포, 동대문 등 북부지역, 서초, 강남 등 남부지역에서 기온이 높게 나타나고 있다. 이러한 고온지역의 분포는 도시열섬효과의 결과이며, 고층건물 증가, 도로포장 증가, 녹지대 감소 등 토양피복 변화와 밀접한 관련이 있다(서울연구원, 2018).

서울시의 지난 50년간 강수 추세를 살펴보면, 연강수량은 매년 약 4mm씩 증가하고 있으며 연 강우시간은 1.5시간 감소하는 반면 연속최대 강우시간은 매년 0.08시간씩 증가하고 있는 추세이다(서울시, 2013; 강정은·이명진(2015)에서 재인용). 여름철(6월, 7월, 8월) 강수량 합은 892.1mm로 연강수량의 약 61%를 차지하여 전체 강수량 중 여름철 강수량의 비율이 매우 높다. 반면 겨울철(12월, 1월, 2월) 강수량 합은 67.3mm로 연강수량의 약 5%에 불과하다(기상청, 2017). 서울시의 연강수량은 점차 증가하는 경향을 보이지만 강우일수의 증가는 크지 않은 특

정을 가진다.

5년(2010~2015년) 평균 1일 최대강우량이 가장 높게 나타나는 지역은 강남구와 서초구의 남부, 강서구 서부, 도봉구 및 강북구의 북부이고 가장 낮은 1일 최대강우량이 나타나는 곳은 서울 중앙의 한강 양안지역, 금천구, 관악구 남부, 은평구 북부, 노원구 동부이다(기상청, 2016).

3.2. 연구자료

본 연구에서는 선행연구를 토대로 수해에 영향을 줄 수 있는 변수들을 다음과 같이 정리하였다. 변수는 분석에 용이하게 크게 종속변수와 독립변수로 이루어져 있으며, 독립변수는 기상 요소, 자연적 요소, 인위적 요소로 나뉘었다. 분석에 활용된 종속변수는 서울시에서 5년간(2010-2014년) 일어난 침수피해 이력이다. 이는 서울시 전역에서 집계된 침수 피해지를 정리 해놓은 자료로, 수해²⁾로 인한 재난 지원금을 지급하기 위해 피해지와 피해액, 지원지급금액이 기록된 자료이다. 수해는 기상특보가 발효된 시기 중에 입었던 피해를 대상으로 신고 받은 지역과 그 내용을 기초로 피해사실을 자치구에서 확인하여 피해정도에 따라 차등지급³⁾하였다.

분석에 사용된 종속변수는 침수 발생빈도이다. 총 40917개⁴⁾의 지점에서 침수피해가 일어났으며 분석에 활용되었다. 이 데이터는 침수피해지에 기록된 주소를 활용하여 지오코딩(geocoding)하였다. 지오코딩 된 자료를 ArcMap 프로그램을 활용하여 점 데이터로 나타낼 수 있었다. 빈도

2) 재해는 전파, 반파, 침수에 해당한다(자연재난 구호 및 복구비용 부담기준 등에 관한 규정 제9조).

3) 피해 정도(전파, 반파, 침수)에 따라 차등 지급한다(자연재난 구호 및 복구비용 부담기준 등에 관한 규정 제9조).

4) 지오코딩과정에서 주소지가 올바르게 표기되지 않거나 지오코딩에 되지 않은 주소는 제외하였다.

값을 추출해내기 위해 서울시를 가로 300m와 세로 300m, 총 10,000개의 격자를 점 데이터와 중첩시켰다. 각 격자 내의 점들의 개수를 추출해낼 수 있었고 이를 종속변수로 사용하였다.

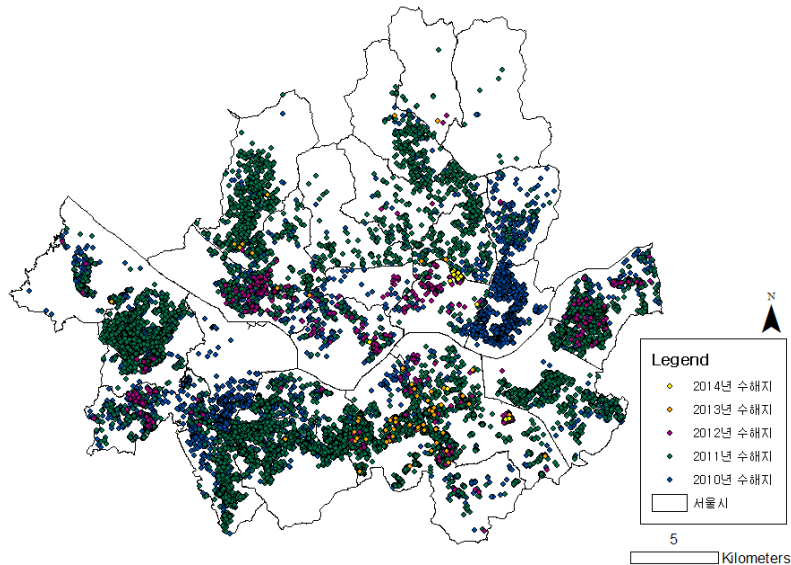


그림 2 지오크딩 된 연도별 침수 발생지

침수피해지의 특징을 알아보기 위해 지형·환경적 인자들을 활용하였다. 지형적 여건에 따라 유량이나 유속, 유수나 물 빠짐의 정도가 달라진다(고태규·이원영, 2012b). 따라서 지형요인의 경우 물의 이동과 연관된 요인들을 고려하였다.

유출속도에 영향을 미치는 지표로 고도와 경사도를 들 수 있다(신상영, 2011). 고도는 위치의 높고 낮음을 표현하는 지표이며 지표수는 지표의 기복을 따라 높은 곳에서 낮은 곳으로 흘러간다. 경사는 고도의 변화를 측정할 때 쓰이는 개념으로 경사도에 따라 유속에 확보에 영향을 미쳐 침수피해율이 달라지는 경향이 있다. 저경사 평탄지 지역은 도시계획 측면에서 좋은 입지조건이 될 수 있으나 적정 유속확보의 어려움으로 불리한 우수배제조건이 될 수 있다(신상영, 2011). 그림3과4에서 볼 수 있듯이 서울시의 저지대와 저경사도인 지역은 강서구, 안양천 부근의 영등

포구와 금천구, 성동구의 중랑천 지역, 탄천을 포함한 송파구, 강동구 등
임을 알 수 있다.

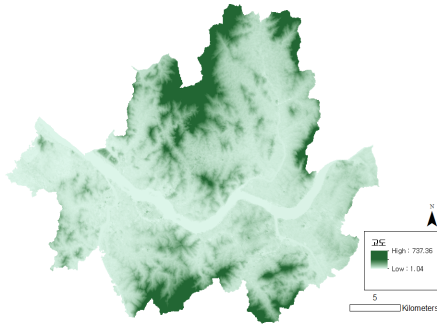


그림 3 서울시 고도

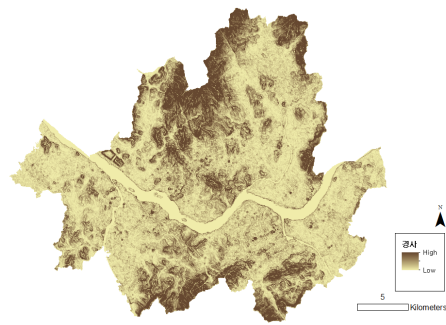


그림 4 서울시 경사도

물의 양을 추정하고 모이는 경향을 볼 수 있는 지표는 사면유역지수 (upslope contributing area)와 습윤지수(wetness Index)가 있다. 사면유역지수는 사면상의 한 지점으로 유입되는 물의 양을 추정하는 변수이다 (박수진, 2004). 사면유역지수가 높은 값을 띄는 곳이 물의 유입이 비교적 높아 침수 가능성을 나타내는 변수라 판단하였다. 습윤 지수는 사면유역지수와 경사를 활용하여 추정하는 지수로서 물이 흘러들어가는 경향을 볼 수 있다(남서정, 2011). 습윤지수는 강우유출현상과 지형특성의 관계를 보여주는 척도이며, 일반적으로 습윤지수가 10을 초과하면 우수의 집중이 발생하기 쉬운 지역으로 평가 된다(신상영, 2011). 따라서 침수 가능성을 나타내는 지수라 판단하였다. 서울시에서 사면유역지수가 높은 곳은 산간지역에서 나타났으며 습윤지수가 높은 지역은 하천유역에서 나타났다.

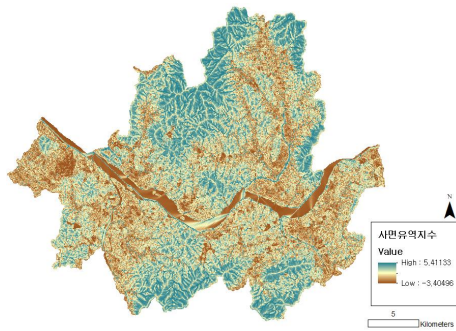


그림 5 서울시 사면유역지수

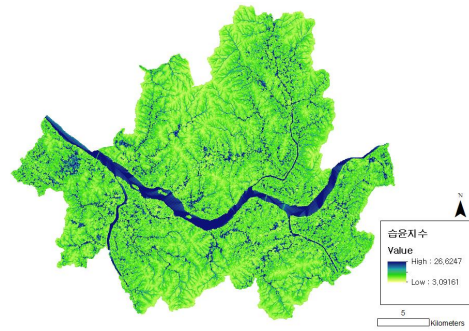


그림 6 서울시 습윤지수

물의 침투에 영향을 주며 이동 속도에 영향을 미치는 지표로는 곡률 (curvature)과 지형특성지수(Terrain Characterization Index; TCI)를 고려하였다. 곡률은 3차원적 사면형태의 굴곡을 파악하는데 용이한 지표이다. 또한 물의 침투에 영향을 주며 물질 이동 속도에 영향을 미친다 (Evans and Cox, 1999). 지형특성지수는 사면분류에 사용되는 사면곡면률과 사면유역지수를 조합한 지수이며 사면을 따라 나타나는 물질이동 잠재력을 추정한다(박수진, 2004). 곡률과 지형특성지수와 같은 요인들은 물이 모이기 쉬운 곳임으로 침수가능성이 높다고 판단하였다.

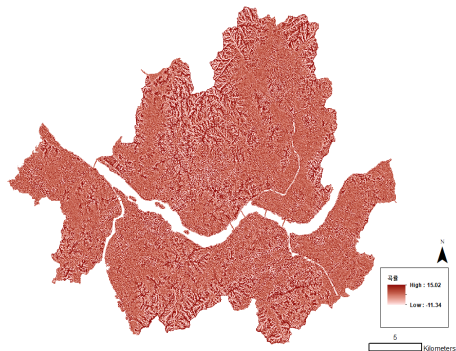


그림 7 서울시 곡률

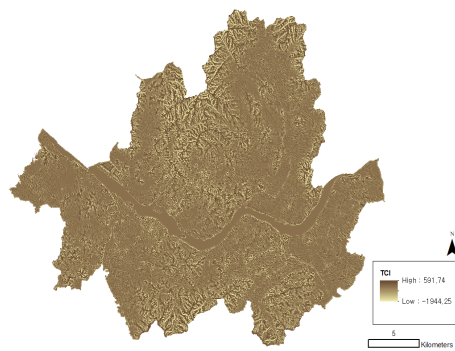


그림 8 서울시 지형특성지수

투수율과 관련하여, 토양도와 식생율을 포함하였다. 토양도는 지형 내부의 토질, 모재, 배수, 암상 등의 지형 정보를 가지고 있는 지표이고, 식

생물은 지표를 덮고 있는 식물의 비율을 의미한다. 토양과 식생의 저류량에 따라 강우 유출의 체적이 다르게 나타난다(박성천 외, 2011). 따라서 토양의 종류와 식생물의 정도에 따라 침수의 가능성이 다르게 나타날 것이라 판단하였다. 그림9와 같이 서울시는 인선타줄 토양이 주로 분포하고 있다. 녹지비율이 가장 높은 자치구는 서초구, 노원구, 강서구로 나타났다(그림10).

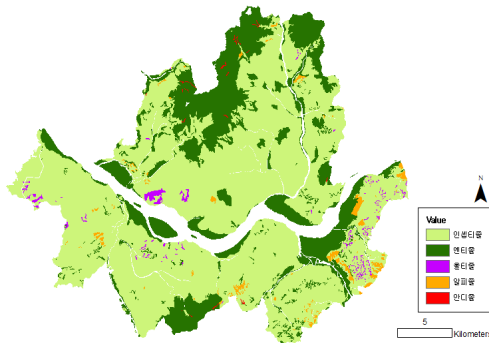


그림 9 서울시 토양도

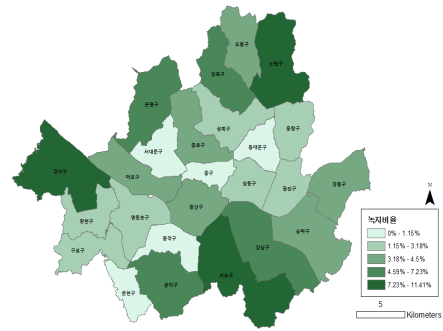


그림 10 서울시 녹지율

서울시는 한강을 중심으로 총 36개의 중소하천이 있다. 대체로 굴곡이 심하고 유역면적에 비해 유로연장이 짧아서 침투유량이 크기 때문에 홍수피해가 크다(서울시, 2018). 하천과의 거리는 하천수위상승에 따른 내수범람이나 하천변 저지대에 주로 발생한다는 점에서(국토연구원, 2008) 하천과의 거리 인자를 선정하였다. 침수 발생 지점에서 가장 가까운 하천의 거리를 측정하였다. 하천과의 거리를 측정하기 위해 사용하였던 하천은 환경부에서 제공하는 자료로 ArcMap을 통해 거리를 추출하였다.

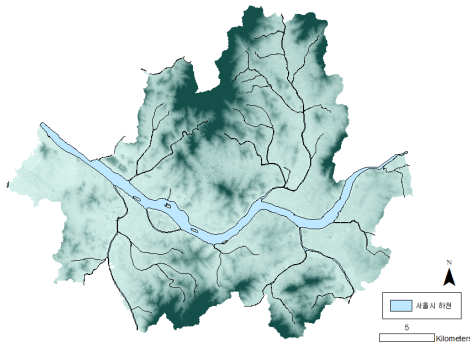


그림 11 서울시 하천

기상 지표들은 침수 유발과 관련된 기상변수들로 한 시간 최대 강수량, 일평균 강수량을 고려하였다. 강수량은 침수피해에 영향을 미치는 근본적인 요인이라 할 수 있다. 기상청 기준으로 1시간에 30mm이상이나 하루 80mm이상의 비가 내릴 때 집중호우라고 정의 내린다(강정은·이명진, 2012). 이를 토대로 평균 강수량과 한 시간 최대 강수량을 기상요인으로 선정하였다. 자료에 쓰인 기상요인은 기상청 국가기후데이터 센터에서 제공하는 자료를 활용하였다. 침수가 일어난 해당 기간의 강수량을 파악하고, 관측된 기상관측소 지점과 강수량 자료를 IDW(Inverse Distance Weighting)기법을 사용하여 내삽 하였다. 그림12, 13과 같이 최근 5년간 서울시의 강수량은 주로 동부지역에 집중되어 있음을 알 수 있다.

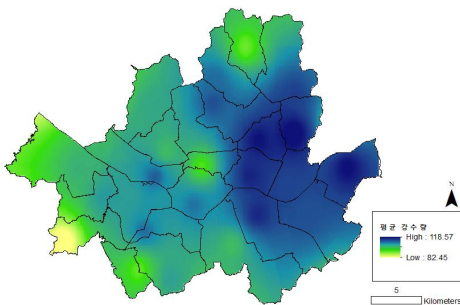


그림 12 평균 강수량(2010-2014년)

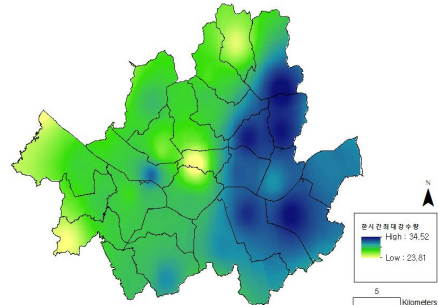


그림 13 서울시 한시간 최대 강우

인위적 지표로 불투수율과 토지피복도를 추가하였다. 불투수율의 증가는 자연적 배수기능의 토지면적의 감소와 유출량 증가를 일으키기 때문에, 수해의 취약성에 대한 실증분석을 위해서는 불투수면적의 고려가 필수적이다(최충익, 2004). 토지피복도는 사람들이 모이고 많은 시설물들이 밀집한 지역에서 많은 피해를 유발하는 특징을 가졌다(최충익, 2004). 불투수율은 서울도시계획포털에서 제공하는 2010년 서울시 도시생태현황도에서 불투수면적을 추출한 자료이며, 토지피복도는 국토환경정보센터에서 제공하는 2009년 토지피복도를 사용하였다.

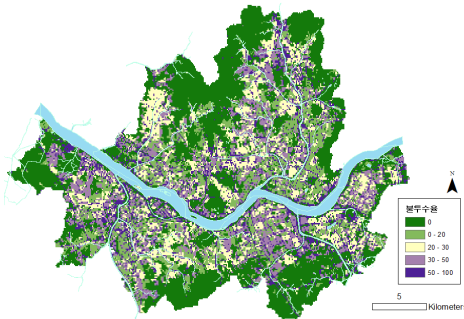


그림 14 서울시 불투수율

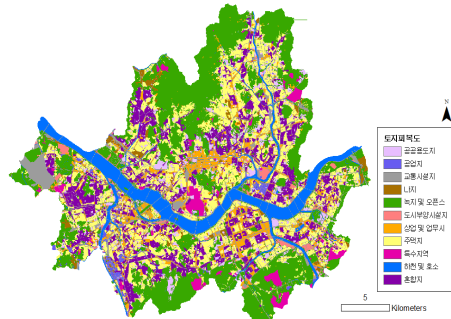


그림 15 서울시 토지피복도

고도, 경사도, 사면곡면률, 사면유역지수는 SRTM 30m 수치고도자료 (DEM)를 ArcMap프로그램을 통해 각 요인들을 추출하였다. 모든 인자들은 공간 데이터화시켰고, 이들 자료들 중 연속형 자료는 평균값, 범주형 자료는 주요(major)값을 추출해내어 각 격자 내에 포함시켜 분석에 사용하였다.

표 1 분석에 사용된 자료와 그 의미

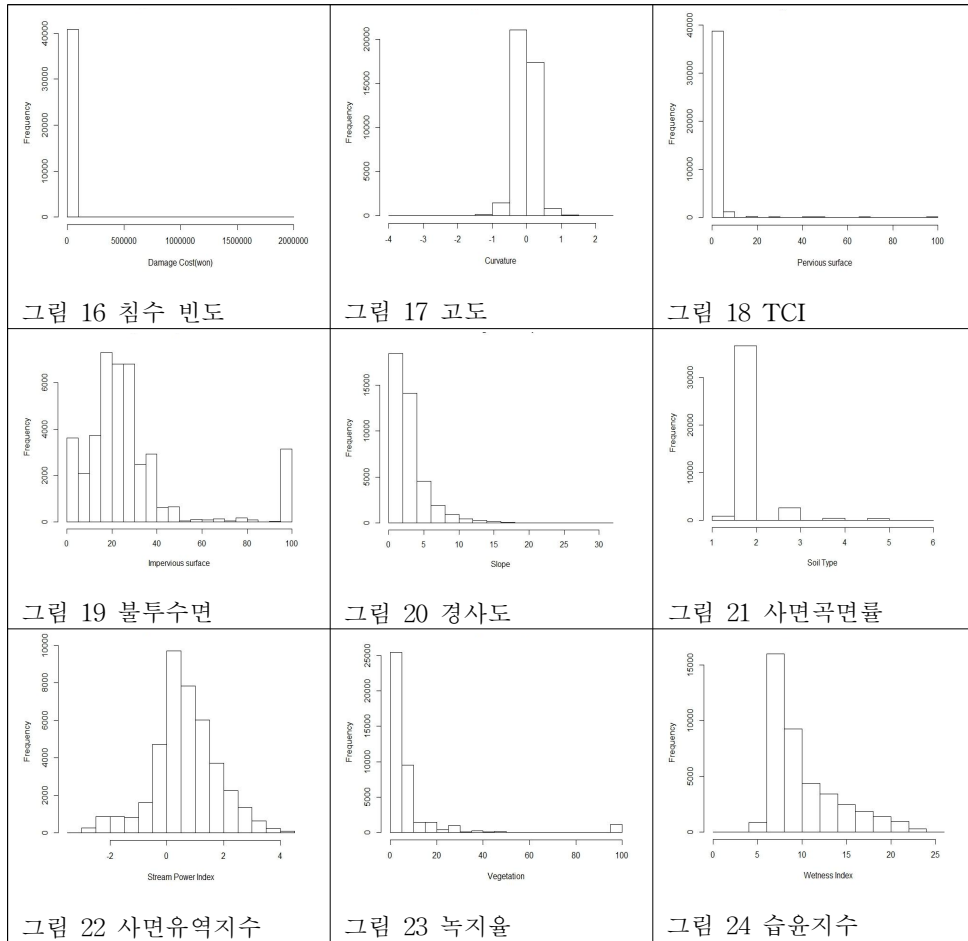
인자 특성		자료 유형	단위	자료 출처	참고문헌
대분류	소분류				
지형	하천과의 거리	연속형	m	하천망도 - 환경부 침수 지점과 가장 가까운 하천의 거리를 ArcMap을 활용해 측정	강정은 등, 2012
	고도	연속형	m	SRTM 30m DEM	신상영, 2011
	경사도	연속형	°	SRTM 30m DEM	윤중석, 2013
	사면곡면률	연속형		SRTM 30m DEM	강정은 등, 2015
	사면유역지수	연속형	$\log_{10}m^2$	SRTM 30m DEM	
	습윤지수	연속형		SRTM 30m DEM	
	지형특성지수	연속형		사면유역지수 * 곡면률	
	불투수율	연속형	%	2010년 도시생태현황도 내에 불투수면적 추출 (서울도시계획포털)	강정은 등, 2015
	녹지율	연속형	%	2010년 도시생태현황도 내에 녹지현황 추출 (서울도시계획포털)	김지수, 2013
	토양도	범주형 (4범주)			강정은 등, 2012
기상	일 평균 강수량	연속형	mm	IDW 내삽법, 30개 $+\alpha^{5)}$ 기상관측소(기상청 국가기후데이터센터)	강정은 등, 2012
	한시간 최대 강수량	연속형	mm		
	토지피복도	범주형 (22범주)		2009년 중분류 토지피복도(환경부)	신상영, 2011

- 5) 서울시 내에 기상관측소를 기본으로 IDW를 실행하였으나 결과 값이 서울시 전체를 포괄하고 있지 않거나 누락된 자료는 근처 경기도 지역의 관측소를 포함해 IDW를 실행하였다.

3.2.1. 자료 검증

회귀분석에 앞서 서울시 침수발생과 침수에 영향을 주는 요인별 관계를 살펴보았다. 자료가 안정되지 못하면 모형의 계수 추정이 원활하게 이루어지지 못하며 추정된 계수 값 역시 신뢰 할 수 없게 된다(최충익, 2004). 따라서 활용된 자료들이 정규분포의 형태를 따르는지 알아봄으로써 분석이 가능한지 알아보았다. 자료들이 정규분포임을 확인하기 위해서는 일반적으로 그래프를 그렸을 때, 평균(μ)을 기준으로 좌우대칭을 이루는 종모양이 나타나며, 평균에 의해 정규곡선의 위치가 정해진다. 침수빈도와 요인간의 정규분포를 살펴보았을 때 다음 표와 같다.

표 2 요인별 정규성 검증(x축 각 요인, y축 도수)



그래프를 확인해본 결과 종속변수인 침수빈도에서 정규성이 관찰되지 않았다. 이는 종속변수는 서울시에서 발생하는 침수피해 횟수인 점과, 정수로 이루어졌기 때문이다. 따라서 포아송 분포(Poisson distribution)를 확인하였다. 포아송 분포는 일정 시간 및 공간에서 한 사건의 출현횟수를 갖는 분포이다. 최근 5년간 서울시 침수빈도를 포아송 분포로 나타내면 다음 그림과 같은 결과가 나타난다.

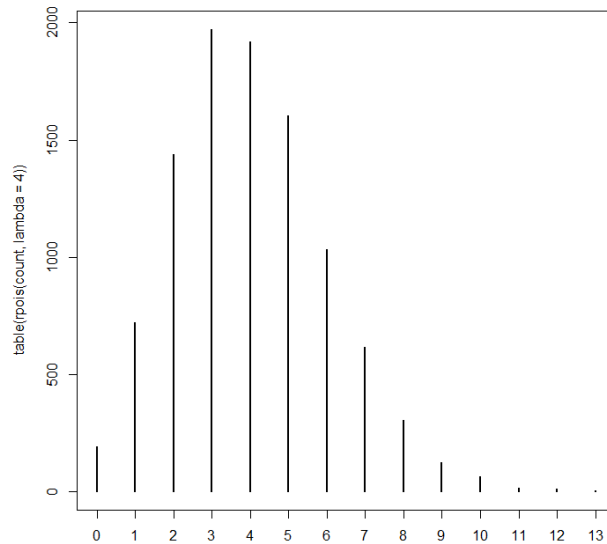


그림 25 발생빈도에 대한 포아송 분포

그림25와 같이 침수빈도는 포아송 분포를 따르고 있음을 확인하였다. 따라서 분석에 활용된 회귀분석은 포아송 회귀분석을 활용하였다. 두 번의 분석에서 사용된 종속변수가 같다는 점에서 두 분석 모두 포아송 회귀분석을 활용하였다.

3.3. 연구방법

서울시의 침수피해 지역적 특성을 분석하기 위해 본 연구는 3가지 관점에서 접근한다. 첫 번째로 서울시 침수피해지의 분포를 알아보기 위해 세미베리오그램 분석(semivariogram analysis)과 K-함수(K-function), 점 패턴 분석(point pattern analysis)을 시도했다. 세미베리오그램 분석(semivariogram analysis)에서는 공간적인 경향성이 있는지 확인할 수 있으며 K-함수(K-function)에서는 공간적인 분포가 무작위로 나타나는지 밀집된 양상을 보이는지 알 수 있다. 밀집된 양상은 커널 밀도(kernel density)를 통해 표현한다.

두번째로 침수 피해에 영향을 미치는 잠재 요인들을 추출하고 공간 분포를 확인한다. 자연·환경적 요인을 추출하기 위해 요인분석을 사용하였고, 추출된 요인은 지도화시켜 분포를 확인했다. 마지막으로, 요인분석을 통해 도출된 요인들을 사용해 포아송 회귀분석하여 어떤 요인이 침수 피해에 주된 원인이 되는지 알아보았다.

1) 점 패턴 분석(Point Pattern Analysis)

점 패턴 분석은 침수피해발생지가 갖는 지역적 특징을 알아보기 위해 필요하다. 침수 발생지이 특정 지점에 밀집되어 있는지, 일정하지 못한 패턴을 보이는지 살펴본다. 패턴이 무작위 분포면 각 점은 서로 독립적이며 다른 요소와는 독립적이라는 것을 의미한다. 즉, 한 지점의 위치는 다른 지점이 주변에서 관찰 될 확률에 영향을 미치지 않으므로 각 지점은 다른 지점과 완전히 독립적이다 (Bivand et al., 2008).

반면, 공간이 군집되어 있다는 것은 사건이 그 공간 모든 영역에서 똑같이 발생한다는 것을 의미한다. 점 패턴이 무작위가 아닌 경우 두 가지 다른 방법으로 분류 할 수 있다. 군집되어있거나 혹은 정규분포를 가지며 클러스터 된다는 것은 이벤트 수가 평균보다 높은 영역으로 군집되어 있다는 것을 의미한다.

본 연구에서 K-함수(K-Function)를 통해 서울시 침수발생지의 공간 거리의 특성을 확인하였다. K-함수는 점이 군집되어 있는지 아니면 무작위로 분포하고 있는지 알아보는 방법으로서, 점의 수와 일정 거리 내에 분포하는 점의 수를 비교하는 방법이다(곽한빈 등, 2010). 따라서 침수 빈도값을 나타내는 점사이의 거리연산을 통해 추출한 군집정도를 파악했다.

2) 커널 밀도(kernel density)

커널 밀도(kernel density) 계산법은 심플 밀도(simple density) 계산법과 계산방법은 동일하나 분석지역의 중심으로부터 점(point)나 선(line)과 같은 공간객체가 위치한 곳의 거리에 대하여 가중치를 부여하여 밀도

(density)를 계산하게 되는데, 분석지역의 중심에서 가까운 곳에 위치한 공간객체는 중심에서 멀리 떨어진 곳에 위치한 공간객체 보다 높은 가중치를 주어 밀도를 계산하는 방식이다. 커널 밀도를 통하여 밀집된 지점들의 자연 환경적 특징을 자세하게 알아보기 위함이다. 강도의 공간 분포를 결정할 수 있는 또 다른 방법은 커널 평활화 (Diggle, 1985; Berman and Diggle, 1989, Bivand et al., 2008)를 사용하는 것이다. 이러한 방법은 연구 영역에서 연속적으로 강도를 계산하고 R에서이 분석을 수행하기 위해 밀도 추정의 대역폭을 정의해야 한다. 이 대역폭 추정은 기본적으로 추정의 영향 영역을 결정합니다. 올바른 대역폭을 결정하는 일반적인 규칙은 없다. 일반적으로 h 가 너무 작으면 추정치가 기복이 심하며 h 가 너무 크면 추정치는 과도한 스무딩(smoothing)으로 인해 점 패턴의 중요한 요소를 놓칠 수 있다 (Scott, 2009).

3) 포아송 회귀분석

침수 피해에 대한 서울시 전 지역에 대한 자연 환경적 요인을 분석을 위해서는 일반화된 선형 모델 중 하나인 포아송 분포(Poisson distribution)를 통해 모델링을 한다. 포아송 분포란 이산 확률 분포로 단위시간이나 단위공간에 대해서 어떤 사건의 출현 횟수가 갖는 분포이다. 종속변수가 정수로 딱 떨어져서 셀 수 있는 경우를 이산형이라 한다. 포아송 분포는 일정 주어진 시간 동안에 발생하는 사건에 대한 발생 수의 확률 분포를 해석하는 데 사용되며 사건이 독립적이고 랜덤하게 발생한다. 포아송 분포는 다음과 같은 식으로 설명되어 진다.

$$f(x;m) = \frac{e^{-m}m^x}{x!}(x=0,1,2...), x \sim Poisson(m)$$

침수가 발생하는 사건의 수를 x 라 하고 주어진 시기 동안 혹은 공간에서 평균 발생 횟수를 m 이라 한다. x 의 건수는 0부터 ∞ 까지 존재할 수 있다(Brain & Engelhardt, 1992; 최충익(2013)에서 재인용).

포아송 회귀분석에 앞서 본 연구에서는 서울시 전체 지역을 격자로 나누어 격자 내 5년간의 침수 피해 빈도수 횡수에 대한 확률 변수 추정을 하여 일반화된 선형 모델링을 한다. 본 연구에서 주된 관점은 포아송 모델을 통해 정확한 피해 빈도 예측에 있는 것이 아니라 서울시의 상습 침수 피해를 유발하는 주된 자연적인 환경 인자를 무엇인지 알고자 하는 것이다. 따라서 본 연구에서는 먼저 서울시 전체 지역에 대한 침수 피해 모델링을 통해 주된 침수 피해를 주는 자연·환경적인 환경 인자를 찾아 분석한다.

4) 요인분석

요인분석(factor analysis, 인자분석)은 측정 자료 및 변수들 간의 상관관계를 고려해서 이들 간에 공유하는 구조를 파악해 내는 기법을 말한다. 요인분석의 주된 목적은 불필요한 자료 제거하고 방대한 자료들 요약하며 자료들 간의 공통된 상관관계를 가진 잠재변수를 추출하여 자료들 즉 변수의 구조를 파악하는데 있다. 변수들 간의 상관관계가 높다는 것은 하나의 요인으로 나타날 수 있다는 것을 의미하고 측정 변수들 간의 상관관계가 낮다는 것은 하나의 요인으로 묶이지 않는다는 것을 의미한다. 하나의 요인으로 묶여지는 요인을 잠재 변수라 하며 관찰할 수 없는 변수로 측정변수들 간의 상관관계를 생성시키는 있는 요인(factor)으로 간주한다.

요인분석은 크게 확인적 요인분석(confirmatory factor analysis)과 탐색적 요인분석(exploratory factor analysis)으로 구분 될 수 있다. 확인적 요인분석은 측정변수들 간의 구조에 대한 가정을 주어진 경험적 자료와의 비교를 통해서 확인 평가하는 것이며 측정모형에서 설정된 경로에서 요인계수를 취하는 방식이다. 탐색적 요인분석은 자료에 내재되어 있는 특성을 탐색하여 각 측정변수는 같은 요인으로 묶일 것으로 추측되는 변수 그룹들과 높은 상관관계를 지녀야 한다. 사용되는 모형으로는 주성분분석(PCA; principal component analysis)가 가장 많이 사용되는 방법이다. 주성분분석은 측정 변수 간에 서로 연관되어 있는 서로 독립적인

소수의 잠재 변수로 차원 축소를 하며 이를 주성분 요인으로 취하는 것이다. (Kang et al., 2005). 이러한 주성분분석법은 측정 변수들의 전체 분산이 최대한 설명될 수 있도록 주성분(요인)을 추출한다.

본 논문에서는 탐색적 요인 분석 중 PCA 모델을 통해 요인 분석을 하였고 요인 수 결정하는데 있어 Cartell과 Harman (1966)에 의해 제안된 스크리 검사(scree test) 방법을 사용하였다. 스크리 검사는 고유 값의 크기를 그래프에 나타낸 도형(scree graph)에 나타나게 하여 적절한 요인의 수를 결정하는 것이다. 요인 수가 증가하면 고유 값이 급격하게 작아지다가 일정 수준에 이르면 완만한 하락으로 추세가 바뀌는 지점이 최적 요인 수이다.

이 기법은 그래프의 모양이 X축과 평행되는 시점이 뚜렷하지 않을 경우 최적 요인 수를 결정하는데 객관성이 떨어지는 단점도 있으나 대부분의 경우 최적 요인의 수를 찾는 데 있어서는 다른 방법들 보다 우수하다는 사실이 여러 가지 모의실험의 결과를 통해 밝혀져 있다(Kang et al., 2005).

소프트웨어에서 제공하는 요인 추출방법은 매우 다양하지만 문헌에서 주로 언급되는 것은 주성분분석법(principal component method), 주축요인법(principal axis factor method), 최대우도법(maximum likelihood method) 등이다.

4. 침수지역의 특징과 영향인자 분석

4.1. 침수피해지역의 분포 특성

이 장에서는 최근 5년(2010-2014)간 서울시 침수피해지의 분포특성을 전역적으로 확인하였다. 먼저 수해지점들을 지도화 시켜 5년간 서울시 침수 현황에 대해 살펴보았다. 두번째로 침수발생지의 분포 특성을 알아보았다. 침수발생지의 특징을 알아보기 위해 두 가지 방법론을 사용하였다. 공간적인 경향성을 알아보기 위해 점 패턴 분석(Point Pattern Analysis)을 실시하였고 밀집 양상을 객관적으로 알아보기 위해 커널밀도(Kernel Density)를 시행하였다.

4.1.1. 침수피해 현황

서울시 침수피해는 전역에 걸쳐 분포되어 있으나 연도별로 침수 피해가 일어나는 곳이 일정하지 않고 지역적 편차가 크다. 실제로 1990년대 서울시의 수해는 서울시 전역에 걸쳐 발생하였으며 단시간에 강한 비가 내림으로서 한강수위가 상승한 상태에서 지속된 호우로 인한 침수와 한강 홍수가 대부분이었다(강현웅, 2015). 하지만 2000년대에 들어서며 국지적이며 집중적인 강우로 서울 지역 곳곳에 돌발 홍수를 발생시켰다(강현웅, 2015). 최근 5년간(2010-2014년) 서울시 침수피해 추이를 보면 총 40917건이 발생하였다.

일반적으로 홍수피해는 외수와 내수로 인한 침수피해로 구분할 수 있다. 외수피해는 하천 및 지천들의 범람, 제방의 붕괴 등으로 발생한 것이며 내수 침수피해는 배수로, 하수도, 펌프장과 같은 배제 능력의 부족이 주된 원인이다(김윤중, 2002). 과거 도심지역의 침수피해 형태가 제방의 물이 넘치는 등 도시 외부로부터 들어오는 물에 의한 홍수피해가 주를 이루었으나, 2000년대 이후에는 도시지역 내부의 물이 원활하게 외부로 빠져나가지 못하여 침수가 발생하는 도시수해가 주된 양상을 보이고 있다. 이에 따라 저지대, 반지하, 지하 공간 등에서의 내수침수피해가 주

류를 이루고 있다(NARS, 2012). 하지만 2011년 7월 도립천 범람과 같은 외수침수 피해가 발생하기도 하였다. 2000년대 이후 서울시의 침수피해 원인은 주로 저지대 관련과 하수관거 통수능력 부족 등이다(심우배, 2008).

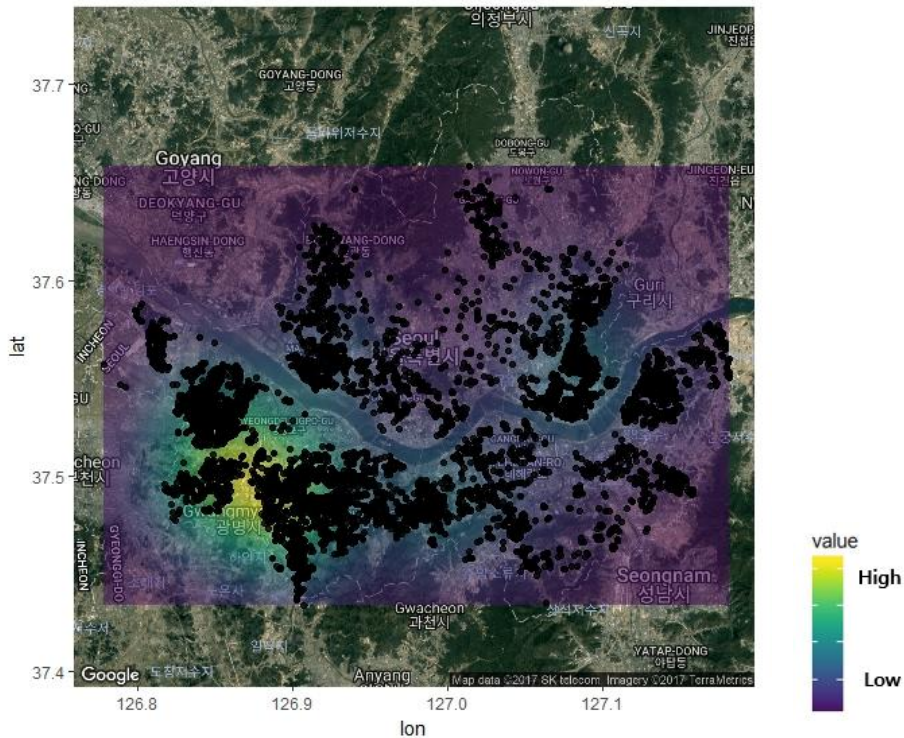


그림 26 2010년 침수피해 현황

2010년의 침수는 주로 집중호우에 의한 피해였다. 2010년에는 침수관련 재해가 총 8건이 일어났으며, 5건이 집중호우, 3건이 태풍에 의한 침수피해였다. 약 3천억 가량의 침수 피해액이 발생 했다. 서울시 전역에서 많은 침수 피해가 발생했지만 주로 양천구, 구로구, 영등포구, 양천구에 밀집되어 있다. 이들 지역은 한강 홍수위보다 낮거나 주변지역에 비해 저지대로 반복적인 침수 위험에 노출된 곳이다(고태규, 2012). 이 지역은 지난 2010년 9월 21일, 시간당 75mm를 초과하는 강수량으로 인해 피해

가 컸다.

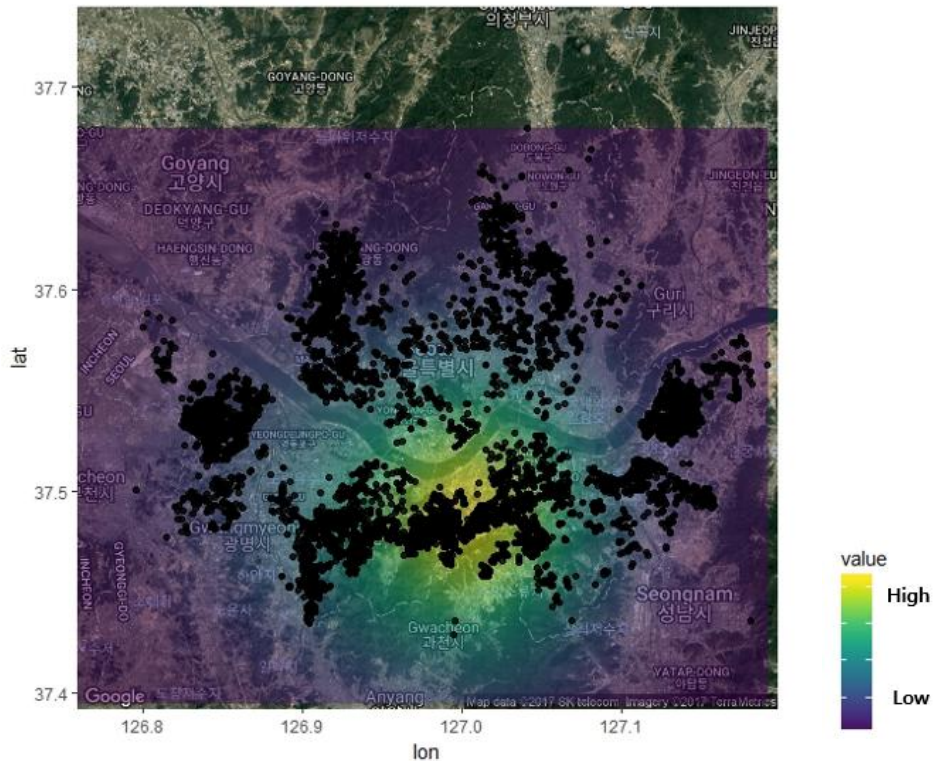


그림 27 2011년 침수피해 현황

2011년에는 총 4건의 침수 관련 재해가 일어났으며 모두 집중호우에 의한 침수였다. 19,489개의 지점에서 침수피해가 있었고 5천억의 피해액이 발생했다. 주로 동작구, 서초구, 강남구에 피해가 밀집되어 있다. 특히 사당역, 강남 일대에 침수피해가 크게 발생하였다. 강남일대는 상습 침수지로 꼽히는데, 지형적으로 주변지역보다 저지대이며 반포천 상류부 통수능력 부족, 주거지역과 상업지역이 밀집되어있어(이병주, 2017) 피해를 가중시킨다. 사당지역은 분지지형으로 관악산과 우면산 유역경사가 급하며 유출수가 사당역으로 집중되기 쉽다(최시중 외, 2011).

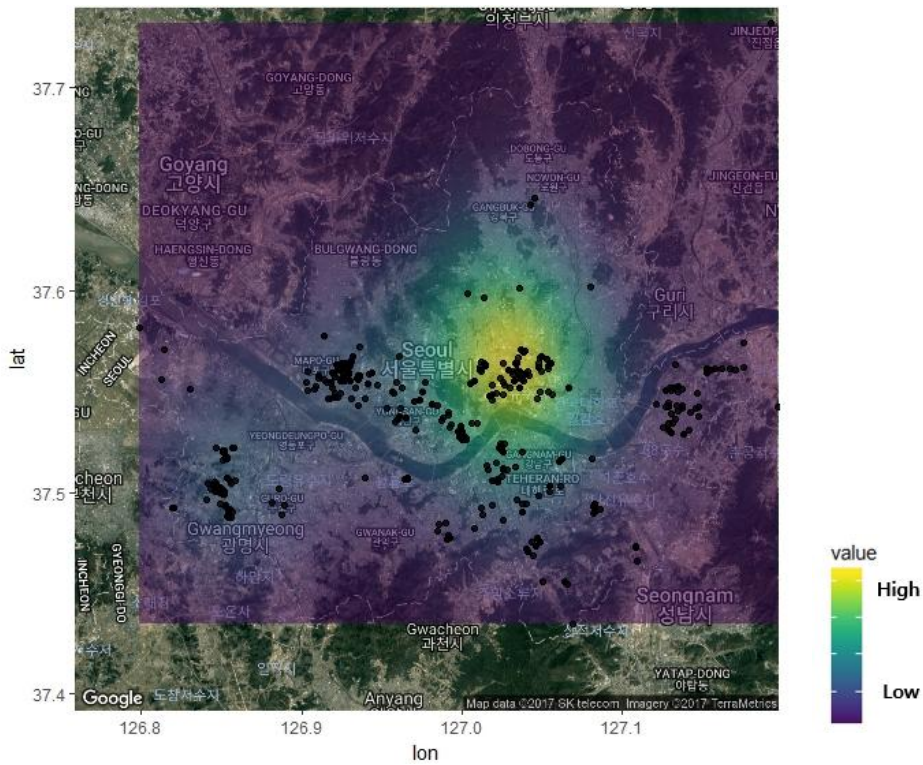


그림 28 2012년 침수피해 현황

2012년에는 2건의 태풍과 4건의 호우가 발생하였다. 78억 원의 피해액이 발생했고, 주로 중랑천 서쪽에서 피해가 많았다. 특히 성동구에 밀집되어 있는데, 성동구는 주로 성수동 일대와 용답동에서 침수피해가 발생하였다. 성동구는 중랑천 하류부에 위치한 평탄한 저지대로 상습 범람원이었다. 남쪽에는 한강이 위치하고 있으며, 중앙부는 청계천과 중랑천이 합류하여 한강으로 흘러들어 이 일대가 범람원에 해당한다(기상청, 2016).

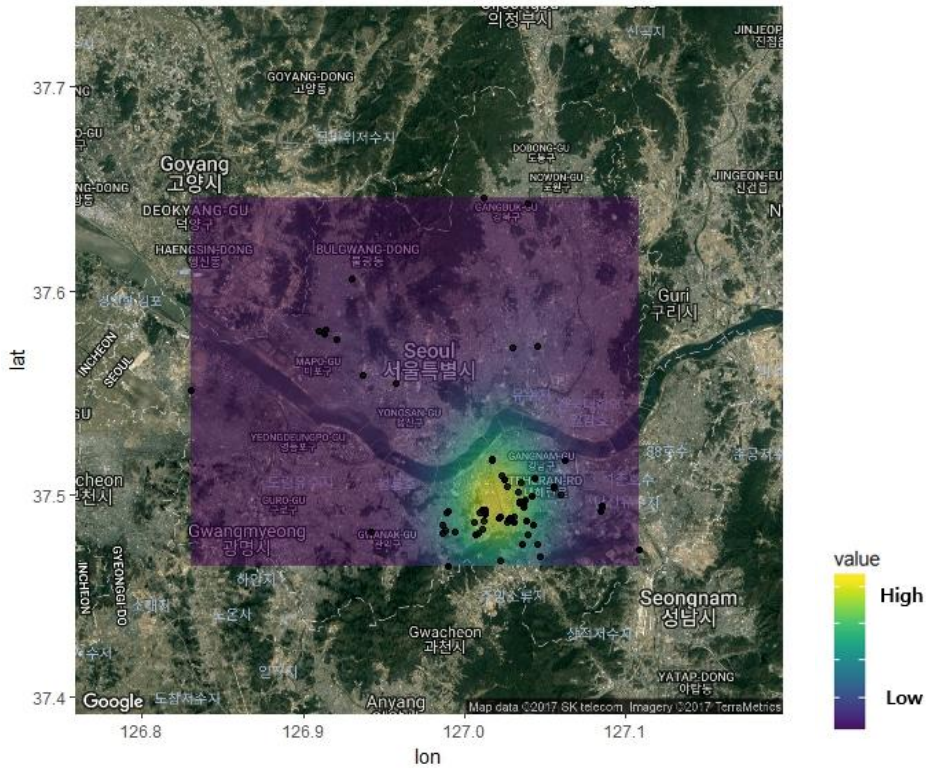


그림 29 2013년 침수피해 현황

2013년에는 104건의 피해가 발생했고 모두 집중 호우에 의한 피해였다. 약 33억원의 피해가 발생했다. 피해지역은 서초구, 강남구 일대에 밀집되어 있다. 이들 지역은 2010년부터 2013년까지 반복적으로 피해가 일어났다.

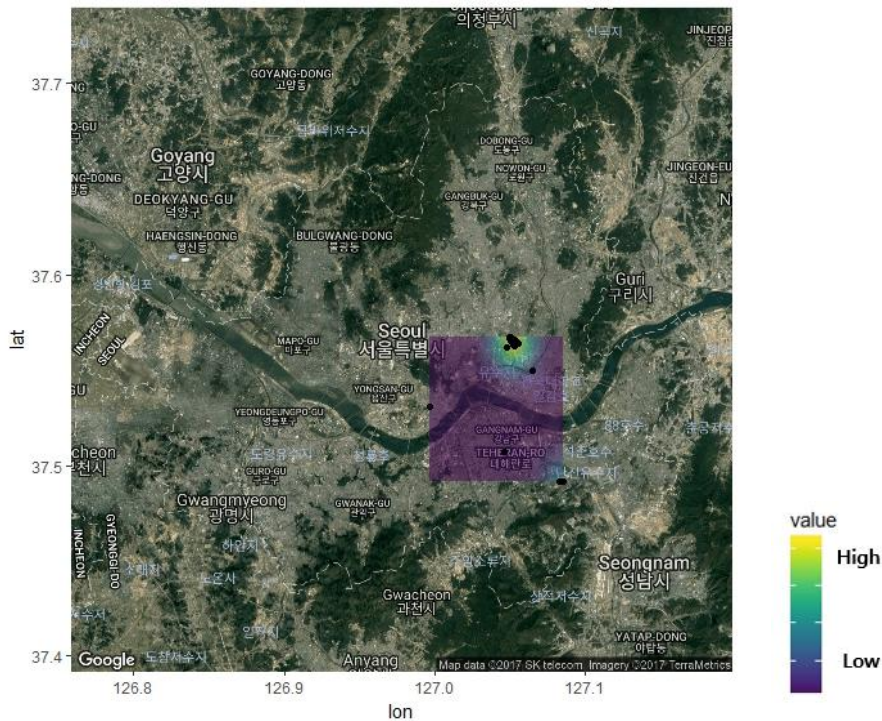


그림 30 2014년 침수현황

2014년에는 3건의 집중호우가 발생해 62지점에서 피해가 일어났으며 약 3억원의 피해 났다. 피해 지역은 2012년 밀집지역과 비슷한 지역으로 주로 성동구에 밀집되어 있다. 평년 대비 강수량이 55%에 불과하여 침수피해는 많지 않았던 것으로 추측된다.

밀집정도는 차이가 있으나 강남일대 경우, 3년 연속 꾸준히 침수피해가 일어났으며 2012년, 2014년 성동구에서 침수가 반복적으로 발생하기도 했다. 이를 통해 상습침수지역이 있음을 확인할 수 있었다. 2014년 강수량이 지난 4년(2010년~2013년)간의 강수량에 비해 적었기 때문에 침수피해의 원인은 기상요인에 의해 크게 영향 받는 것으로 보인다.

침수의 근본적인 원인은 강수이나, 침수현황과 같이 같은 양의 비가 내려도 침수가 일어나고 일어나지 않은 경우가 있다. 침수피해 요인은

단독적인 것이 아니라 복합적이다. 따라서 강수라는 요인 외에 여러 요인들을 활용하여 침수 피해 원인을 밝히고자 한다.

4.1.2. 서울시 침수 지점의 공간 분석

서울시의 침수 피해 지점들을 점 패턴 분석(point pattern analysis)하여 공간 밀집양상과 유사성을 알아보고자 했다. 따라서 k-함수와 세미베리오그램(semivariogram)을 실시했다.

세미베리오그램은 너겟(nugget), 상관거리(range), 문턱값(sill)으로 이루어져 있으며, 관측 값의 공간의존성(spatial dependence)을 설명한다(김종성·이정우, 2016). 상관거리는 상관성이 나타나는 최대거리를 의미하며 상관거리 이상이 되면 자료들 간의 공간적 상관성이 없다는 것을 의미한다(박수진·유근배, 2004). 세미베리오그램의 결과는 그림31과 같다. 상관거리는 1km, 너겟값은 206.52, 문턱값은 521.23으로 도출되었다. 침수지점들의 연관성은 1km이내에서 나타났다.

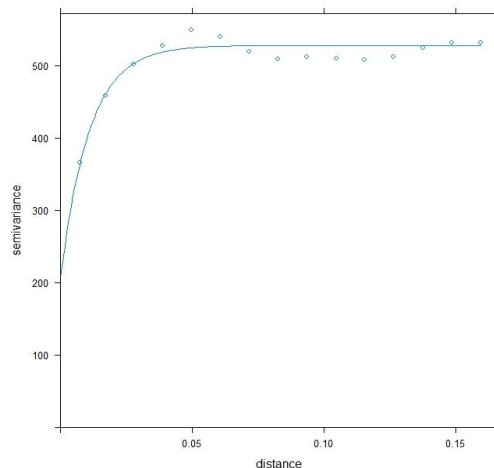


그림 31 세미베리오그램 결과(x축: 거리, y축: 세미베리오그램 값)

k-함수는 공간상의 점들의 군집성을 나타낸다(Kulldorff, 2001). 그림32

와 같이, 점선으로 표시된 선은 모의범위(simulation envelope)를 나타낸다. 무작위 형태가 나타날 때 K-value가 모의범위 아래에 나타나며, 군집 형태가 나타면 K-value가 모의범위 위에 나타난다. 점 사이의 거리가 증가함에 따라 군집성이 서서히 높아지는 것으로 나타난다. K-함수에서 모든 값들이 모의범위에 웃돌았기 때문에 서울시의 침수 피해지의 패턴은 뚜렷한 밀집현상을 보이는 것으로 나타났다(Kulldorff, 2001). K-함수(K-function)는 연구 영역의 크기에 민감하다. 이를 방지하기 위해 가장자리 효과(edge effect)를 교정해야한다. 가장자리 교정(edge correction)을 통해 바이어스를 제거한다. 가장자리 교정법은 리플리(Ripley)를 활용했다.

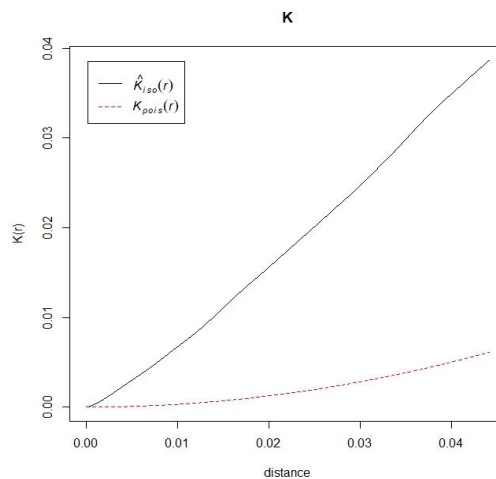


그림 32 K-함수 결과($\hat{K}(r)$: 각 거리별 실제 점 사이의 거리연산 값, $K(r)$: 무작위 분포일 경우 기대되는 값)

그림32와 같이 모든 값들이 모의범위에 웃돌기 때문에 서울시의 침수 피해지의 패턴은 뚜렷한 밀집현상을 보이는 것으로 나타났다. 따라서 서울시의 특정지역이나 자치구에서 침수피해지점들이 밀집되어 있다 해석할 수 있다.

이를 토대로 수해지의 밀집정도를 커널(kernel)방법을 적용하여 시각화

해보았을 때 그림33과 같이 나타낼 수 있다. 커널 밀도(Diggle, 1985; Berman and Diggle, 1989, Bivand et al., 2008)는 강도를 통한 공간 분포를 보여준다.

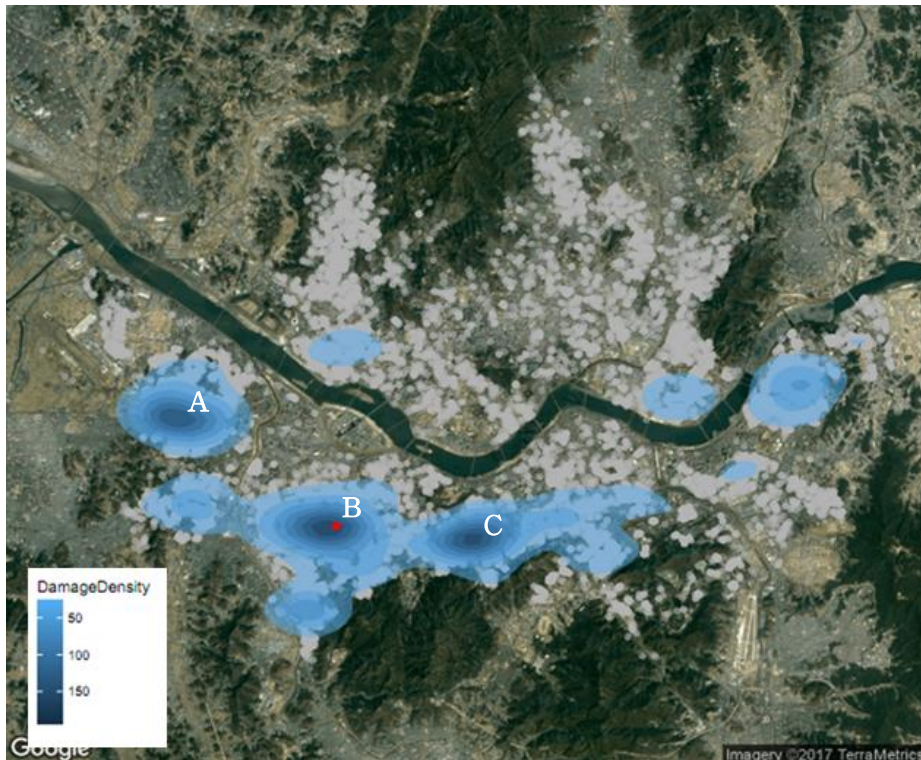


그림 33 서울시 침수피해 밀도

서울시의 수해는 주로 한강이남지역의 안양천, 도림천, 반포천, 사당천, 양재천, 고덕천 저지대에, 한강이북지역에는 불광천 근처와 구의·자양동 일대에 분포되어있다. 밀도가 높은 지역을 4정도로 분류해 보았을 때, 가장 높은 밀도라고 할 수 있는 150이상인 지역은 크게 3지역으로 나타난다. A지점은 양천구 신월동과 강서구 화곡동, B지점은 영등포구 대림동, 동작구 신대방동, 관악구 신림동에 위치해 있었고 C지점은 동작구 사당동, 관악구 남현동을 포함하고 있었다. 빨간 점으로 표시한 지점은 가장 많은 수해가 일어났던 곳으로 관악구 신림동일대에 위치하여 있다. 이

세 지역은 주로 주거지역인 것으로 나타났다. 세 지역 모두 하천과 근접했는데 A와 B지역 사이 안양천 하류를 끼고 있었다. 특히 B지역의 경우 안양천과 도림천 사이에 위치하고 있으며 C지역에는 약 3m에 반포천이 위치해있다.

A지역은 안양천 동안에 위치해 있으며, 낮은 저지대로 전형적 범람지역이다. 지형적 측면에서 보면 평균 고도는 17.15m, 토지이용 특성을 보았을 때 주로 주택가에서 일어났다. 기후적 측면에서 이 지역 평균 강수량은 100mm, 한 시간 최대강수량은 28mm를 기록했다. A지역에 포함된 강서구 화곡동은 서울특별시에서 지정한 특별관리지역⁶⁾ 11개 지역 중 하나로 저지대 상습침수지역으로 2010년 9월에도 침수 발생한바 있다(서울특별시, 2013). 수해 시 저지대 지역은 하천홍수위 상승하고 배수불량으로 침수 위험성이 높아 현재 빗물펌프장과 같은 배수시설에 의존하는 지역이다(국토연구원, 2008). 침수 이력을 살펴보면 2010년에 침수피해가 유독 A지역에서 컸다. 2010년 9월21~22일 이틀간의 집중호우로 누적 강수량은 259.5mm를 기록하였다(NARS, 2012). 특히 화곡동의 1시간 최대 강수량은 98.5mm를 기록하였으며 이는 약 50년 빈도에 해당하는 강우량이다(NARS, 2012). 또한 강서·양천지역은 목동신시가지 개발로 인해 제방이 축소되고 제내지로 편입된 홍수위보다 낮은 지역이라고 할 수 있는데(고태규, 2012), 집중호우로 기존의 배수시설의 용량을 초과하고 이에 배수가 어려워 상습침수를 발생시키고 있다. 국회입법처(2012)는 이 지역 침수 피해 주된 원인으로 기습적인 집중호우와 하수관거의 통수능력 부족으로 평가하고 있다.

B지역은 안양천과 도림천 사이에 위치하고 있으며 관악산의 북측사면을 이루고 있다. 도림천 유역은 수해에 위험성이 가장 큰 지역으로 침수 피해가 반복적으로 이어지고 있으며 서울특별시에서 지정한 특별 관리

6) 「서울시 주요 침수취약지역(34개소)해소대책」에서는 서울시 주요 침수취약지역을 특별관리지역 11개소, 중점관리지역 16개소, 기타지역 7개소로 구분하여 관리하고 있다고 명시한다(서울특별시, 2013). 이 지역은 도시홍수가 발생했을 때 비교적 많은 재산피해와 인명피해를 동반하므로 집중호우 발생 시 예의 주시해야 할 필요가 있다(서울특별시, 2013).

지역 중 하나이다(강현웅, 2015). 이 지역 하천 합류부는 범람원 지역으로 수해를 자주 입는 곳이기도 하며 저지대 지역으로 내수배제를 위한 하수관거의 경사확보가 확보되지 않아 침수가 발생하고 있는 지역이다(고태규·이원영, 2012b). 도림천 일대의 침수피해는 불투수층의 증가가 주된 원인인데 배수관거의 용량이 원인으로 저지대에 위치한 주택을 침수시키게 되었다. 2011년 7월에 일어난 집중호우의 경우, 관악산의 광범위한 산지 유역에서 짧은 시간에 급격하게 우수가 유입되어 도림천이 범람하고 도림천 주변의 반지하 및 저층 가옥이 침수되었다(강현웅, 2015). 2012년 8월 14일부터 15일 아침까지 이어진 폭우로 산책로 및 도림천 시민공원이 완전히 침수되는 등 반복적인 피해가 발생하는 지역이다(강현웅, 2015).

C지역은 반포천과 사당천이 지나고 있으며 연구대상기간동안 침수피해가 빈번이 발생했던 곳이다. 사당동이 속한 동작구의 경우 침수원인은 주로 주거지역 하수역류로 인한 내수침수와 설계 강우를 초과한 집중호우에 의한 배수 불량이다(이창희 외, 2007). 이 지역은 지하공간의 개발이 고도로 이뤄졌으며 녹지가 부족하다. 주된 침수원인은 기록적인 강우와 설계용량을 초과하여 우수배제가 제대로 이루어지지 못하여 침수가 발생하였다. 사당역의 경우 호우 때마다 사당역 일대와 인근 도로가 반복적으로 침수된다. 이 지역은 저지대이며 폭우 때마다 빗물이 한꺼번에 몰리며 이 일대의 하수 용량이 작고 병목현상으로 빗물의 원활한 배수를 어렵게 하였다(배재현, 2012).

4.2. 서울시 침수 발생의 자연·환경적 요인 분석

앞선 분석은 공간데이터에서 패턴의 존재와 분포 정도를 알아보고 이를 통한 상습 침수 지역을 알아볼 수 있었다. 상습 침수 지역들을 살펴 보았을 때 이 지역들은 공간적으로 상관성이 높고 침수 피해가 반복적으로 발생하는 특성을 보였다. 그러나 관찰된 패턴과 반복적으로 피해가 발생하는 원인을 설명하기에는 제한적이다. 따라서 이장에서는 침수를 발생시키는 요인 및 영향을 주는 요인들 간의 관계를 더 자세히 설명하고자 한다. 침수피해와 영향인자를 알아보기 위해 요인 분석과 포아송 회귀분석을 시행하였다.

4.2.1. 서울시 침수 영향인자 분석

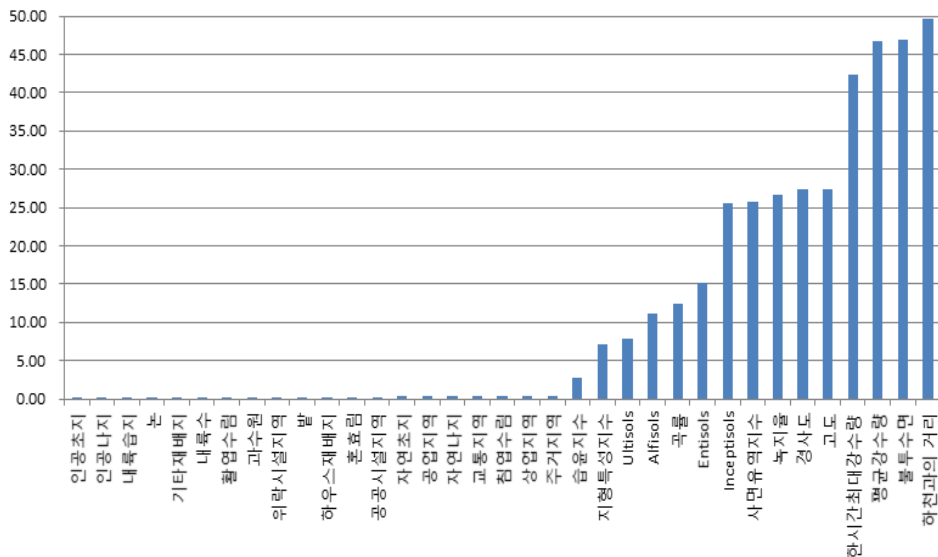
침수피해에 영향인자들의 유의성을 확인하고 지난 5년 동안 서울시에 서 어떤 요인이 침수 피해에 영향을 미쳤는지 알아보기 위해 관계추정모형을 근거로 하는 포아송 회귀분석을 시행하였다.

표 3 침수피해 영향요인 회귀분석 결과

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)	유의성
(Intercept)	4.10E+02	5.40E+01	7.59	3.29E-14	***
한시간최대강수량	1.56E+02	3.69E+00	42.30	< 2e-16	***
평균강수량	-5.65E+01	1.21E+00	-46.78	< 2e-16	***
습윤지수	1.14E+01	4.19E+00	2.72	0.00646	**
경사도	-8.44E+01	3.09E+00	-27.30	< 2e-16	***
곡면률	-1.17E+03	9.40E+01	-12.39	< 2e-16	***
녹지율	-7.07E+00	2.66E-01	-26.59	< 2e-16	***
지형특성지수	1.82E+02	2.55E+01	7.14	9.46E-13	***
사면유역지수	5.16E+02	2.01E+01	25.68	< 2e-16	***
불투수면	1.10E+01	2.34E-01	46.91	< 2e-16	***
고도	-9.82E+00	3.58E-01	-27.44	< 2e-16	***
하천과의 거리	-3.80E+04	7.65E+02	-49.62	< 2e-16	***
주거지역	1.63E+01	5.33E+01	0.31	0.7595	
공업지역	1.47E+01	5.33E+01	0.28	0.78244	
상업지역	1.59E+01	5.33E+01	0.30	0.7661	
위락시설지역	1.36E+01	5.33E+01	0.26	0.79895	
교통지역	1.49E+01	5.33E+01	0.28	0.7806	
공공시설지역	1.43E+01	5.33E+01	0.27	0.78806	
논	1.07E+01	5.33E+01	0.2	0.84137	
밭	1.36E+01	5.33E+01	0.26	0.79857	
하우스재배지	1.36E+01	5.33E+01	0.26	0.79845	
기타재배지	1.23E+01	5.33E+01	0.23	0.81717	
활엽수림	1.26E+01	5.33E+01	0.24	0.8137	
침엽수림	1.55E+01	5.33E+01	0.29	0.77136	
혼효림	1.38E+01	5.33E+01	0.26	0.79588	
자연초지	1.47E+01	5.33E+01	0.28	0.78245	
인공초지	2.95E-02	3.93E+02	0	0.99994	
인공나지	-1.21E+00	4.43E+02	-0.003	0.99782	
내륙수	1.25E+01	5.33E+01	0.23	0.81479	
과수원	1.33E+01	5.33E+01	0.25	0.80292	
내륙습지	9.34E+00	5.33E+01	0.18	0.86088	
자연나지	1.48E+01	5.33E+01	0.28	0.78185	
Inceptisols	2.16E+00	8.44E-02	25.585	< 2e-16	***
Entisols	1.31E+00	8.67E-02	15.088	< 2e-16	***
Ultisols	1.07E+00	1.35E-01	7.921	2.35E-15	***
Alfisols	1.14E+00	1.03E-01	11.071	< 2e-16	***

유의성: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

분석에 활용한 모형을 검증하기 위해 카이제곱 적합도 검정(chi-square goodness-of-fit test)을 활용하였다. 회귀분석결과 각각의 토지피복도를 제외한 모든 인자들이 통계적으로 유의성이 있는 것으로 나타났다.



회귀모형 내에서 가장 높은 중요도를 보였던 변수는 하천과의 거리로 약 49%를 차지하고 있다. 다음으로 높은 설명력을 가지는 변수들은 46%대의 불투수면, 평균 강수량으로 나타났다. 반면, 각각의 토지피복도는 1% 미만의 값으로 도출되어 가장 낮은 값을 차지하였다. 하천과의 거리, 불투수면, 평균 강수량과 한시간 최대 강수량이 침수피해 높은 영향을 미치는 것으로 보인다.

하천과의 거리가 침수 피해에 가장 영향을 준다는 결과는 하천주변의 불투수면의 증가로 홍수를 가중시킨다는 고태규, 이원영(2012)의 연구와 유사성이 있다.

두 번째로 높은 영향을 받는 요인인 불투수율은, 불투수면적율이 타 시도보다 높아 폭우가 내렸을 때 빗물이 스며들거나 흘러들어갈 공간이 상대적으로 적어 침수피해가 높다는 최충익(2013b)의 연구와 관련성이 있다. 또한 한시간 최대 강수량과 일 평균 강수량에서 높은 값이 나왔다는 점에서 폭우가 내리면 제대로 처리할 수 없다는 점에서 불투수율과 기상인자의 복합적인 요인에 의해 침수 피해가 가중됨을 추측할 수 있다.

4.2.2. 서울시 침수 영향인자에 대한 요인 분석

본 연구에서는 침수피해 지역에 영향을 미치는 자연·환경적 요인들을 알아보기에 앞서 요인분석(factor analysis)을 시행하였다. 이장에서의 주목적은 침수피해에 영향을 미치는 주요 인자들을 알아보기 위해 시행되는 회귀모형에 대한 정확도를 요인분석을 통해 향상시키고 더불어 요인 분석 결과 값을 활용해 침수 피해를 가중시키는 요인을 시각적으로 보고자 한다. 요인분석은 변수들 간의 상관관계를 고려하여 내재된 요인을 추출하며 어떻게 서로 상관되어 있는지 파악한다. 또한 데이터 축소가 가능하여 분석결과 모델이 단순해지고 더 높은 성능을 갖게 되는 장점이 있다. 따라서 요인분석을 통해 여러 변수들을 합성변수로 요약함으로써 침수피해 영향을 미치는 요인들을 살펴보고 추후에 수행할 포아송 회귀 분석에 포함시키고자한다. 요인분석을 통해 추출된 합성변수들은 침수피해지역에 영향을 미치는 요인들로 축약할 수 있었고 이 요인들이 어떻게 분포되는지 살펴 볼 수 있다.

요인분석에 앞서 고유값(Eigen value) 방법을 활용하여 요인수를 결정

하였다. 고유값이 1이상임을 확인하기 위해 일반적으로 스크리 도표 (scree table)활용하여 카이저(1960)의 법칙(Kaiser's rule)에 의거하여 고유치 1이상인 곳을 추출하였다. 그림35와 같이 1이상이 되는 첫 구간은 5가 나왔다. 따라서 요인 분석에 활용될 잠재 요인 값을 5로 결정하였다.

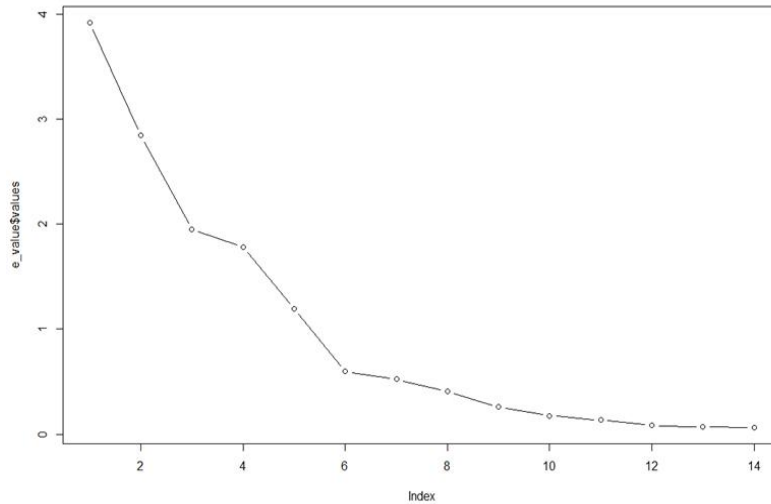


그림 35 고유 값을 활용한 최적의 요인 수를 구하는 그래프 (x축: 요인 수, y축: 고유 값)

요인분석의 결과 해석 시에 필요한 사항은 요인구조(factor structure)를 통해 어느 측정변수가 어느 요인에 속하는지를 결정하고, 높은 적재값을 갖는 측정변수들의 공통적인 의미가 무엇인지를 파악하여 요인의 의미를 부여하는 것이다(강현철, 2013). 서울시 침수 발생인자에 대한 요인 분석의 결과는 표6과 같다.

표 4 서울시 침수 발생인자에 대한 요인 분석의 결과

요인	1	2	3	4	5	공통성	고유분산
한시간 최대 강수량	0.02	0.96	0.01	0.05	0.12	0.94	0.06
일 평균 강수량	0.04	0.95	-0.01	0.03	0.22	0.96	0.04
습윤지수	-0.45	-0.01	-0.06	0.84	0.1	0.92	0.08
경사도	0.91	0.03	0.04	-0.28	0.08	0.91	0.09
사면곡면률	0.15	0.01	0.95	-0.13	0.03	0.95	0.05
식생율	0.41	0.09	0.09	0.26	0.73	0.78	0.22
TCI ⁷⁾	-0.02	-0.01	0.97	-0.1	0.01	0.96	0.04
사면유역지수	-0.04	0.06	-0.2	0.91	0.09	0.89	0.11
불투수면	-0.55	0.44	-0.07	-0.27	0.35	0.71	0.29
고도	0.89	0.07	0.07	-0.16	0.06	0.83	0.17
하천과의 거리	0.17	-0.33	0.02	-0.01	-0.81	0.8	0.20
요인 명칭	유속인자	기상인자	유수인자	유량인자	생태인자		
요인 적재값	2.35	2.15	1.92	1.82	1.41		
주성분 기여도	0.21	0.2	0.17	0.17	0.13		
누적합인	0.21	0.41	0.58	0.75	0.88		

표5와 같이 독립변수들의 점수가 각 요인 별로 부여됐으며 이를 요인 적재값(factor loading)이라 한다. 요인 1에서 5중에서 가장 높은 요인적재값을 중심으로 요인들을 구분지어 잠재변수를 선정하였다.

5개의 잠재변수들에는 11개의 모든 변수들의 값을 포함하고 있다. 그러나 요인별로 두드러지게 높은 값을 나타내는 변수들이 있다. 이들 변수들을 중심으로 구성해보면 다음과 같다. 요인1은 경사도 0.91, 고도 0.89, 불투수면 -0.55로 도출되었다. 요인2는 한시간 최대강수량 0.96, 평균 강수량 0.95로 나타났다. 요인3에서는 사면곡면률 0.95, 지형특성지수(TCI) 0.97로 나타났으며, 요인4는 습윤지수 0.84, 사면유역지수 0.91로 나타났다. 마지막으로 요인5는 하천과의 거리 -0.81, 식생율 0.73으로 구

7) TCI(Terrian Characteristic Index): 지형특성지수를 의미한다.

분 지을 수 있다. 이를 토대로 각 요인을 살펴보면, 요인1은 고도, 경사도, 불투수면을 포함하고 있으며 물의 흐르는 속도와 관련된 지형환경인자이라고 할 수 있다. 요인2는 곡률과 지형특성지수(TCI)를 포함하여 물의 흐름과 관련 있는 지형인자로 볼 수 있다. 요인3은 평균 강수량과 한 시간 최대 강수량을 포함하고 기상인자로 볼 수 있다. 요인4는 습윤지수, 사면유역지수로 구성되어 있으며 물이 모이는 지형 변수라고 할 수 있다. 요인5는 하천과 거리와 식생율을 포함 하고 있어 생태인자로 명명하였다.

공통성은 요인들로 설명되어지는 각 변수들의 백분율로 나타낸 것으로 요인들에 의해 설명되는 각 변수의 분산의 양을 알 수 있다. 일반적으로 공통성의 값이 0.3 이상인 값들은 변수들과 공통점이 있는 것으로 판단한다. 서울시 침수 발생인자들에 대한 공통성은 모두 0.3이상의 값으로 도출되었다. 표5와 같이 주성분 중요도(proportion variance)는 각 요인이 설명하는 총 분산의 비율을 말한다. 따라서 유속인자가 분산의 21%, 기상인자가 20%, 유수인자가 17%, 유량인자가 17%, 생태인자가 13%로 도출되어 총 변동의 88%를 설명된다.

4.2.3. 서울시 침수피해 영향 요인별 분포

앞선 분석에서 침수피해 영향인자들을 요인분석 하여 도출된 잠재변수들을 살펴보았다면, 이번 분석에서는 잠재변수별 공간분포를 확인하였다. 5개의 잠재변수들의 수치를 지도화 시켜봄으로서 요인별 영향을 공간적으로 확인할 수 있었다. 지도는 요인분석과정에서 도출된 잠재변수별 요인 적재값을 활용하였다. 요인별로 추출된 수치는 분위(quantile)별로 5등급으로 분류하여 침수피해 영향요인이 차지하는 공간의 정도를 표현하였다. 분포를 5개로 구분하여 붉은색, 주황색, 노란색, 연두색, 녹색으로 표시했다. 이는 요인의 분포의 정도를 의미하며 침수에 영향을 미치는 정도를 나타내지 않는다.

1) 유속인자의 분포

물의 이동 속도와 관련된 지형인자를 시각화 시켜 보았을 때, 그림36과 같이 나타났다. 붉은 값의 의미는 고도와 경사도가 낮고 불투수율이 높은 지역을 의미한다. 초록색 지점이 많이 나타나는 지점은 고도와 경사가 높고 불투수율이 낮은 지역을 의미한다. 가장 높은 분포가 나타난 지역들은 시내에 무작위로 분포되어 있다. 반면 낮은 값들이 분포되어 있는 지역은 서울시 외곽에 위치한 산악지역이거나 남산, 올림픽 공원과 같은 도심내의 공원이나 산지 지역으로 나타났다.

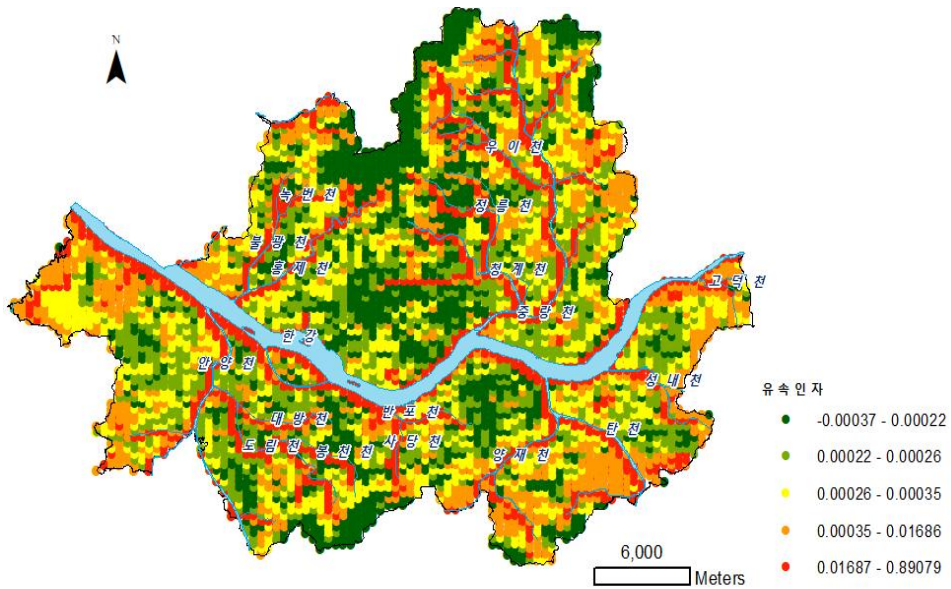


그림 36 유속인자의 분포

그림36을 살펴보면 붉은 지점들이 하천을 따라 분포되어 있음을 확인할 수 있었다. 이는 하천변 저지대 지역으로 추정된다. 시가지로 변모해 오면서 불투수율이 증가하는 추세이다(고태규 · 이원영, 2012b). 하천변 저지대 지역은 전형적인 범람원이었던 곳으로, 침수피해가 상대적으로 빈번하게 일어난다(고태규 · 이원영, 2012b). 실제로 서울시의 하천변 저

지대 지역은 하천수위 상승시 우수배제가 원활하게 이루어지지 못하는 등 다양한 원인이 산재해 있다. 대표적인 사례로 강서, 양천 지역은 목동 신시가지로 자연배수가 제한되는 지역으로 상습침수를 발생시키고 있다. 이는 유속 지형인자의 분포는 불투수율과 저지대에서 침수 영향을 받고 있음을 추측할 수 있다. 유속 지형인자의 분포는 불투수율과 저지대에서 침수 영향을 받고 있음을 추측할 수 있다.

2) 기상인자의 분포

침수피해에 있어 강수량은 침수피해에 영향을 미치는 가장 근본적인 요인이라 할 수 있다. 이를 포함하고 있는 기상인자를 그림37과 같이 시각화 하였다. 붉은 색이 나타나는 지점들은 강수량이 많은 지역을 의미한다. 초록색 지점은 강수량이 적은 지역을 의미한다.

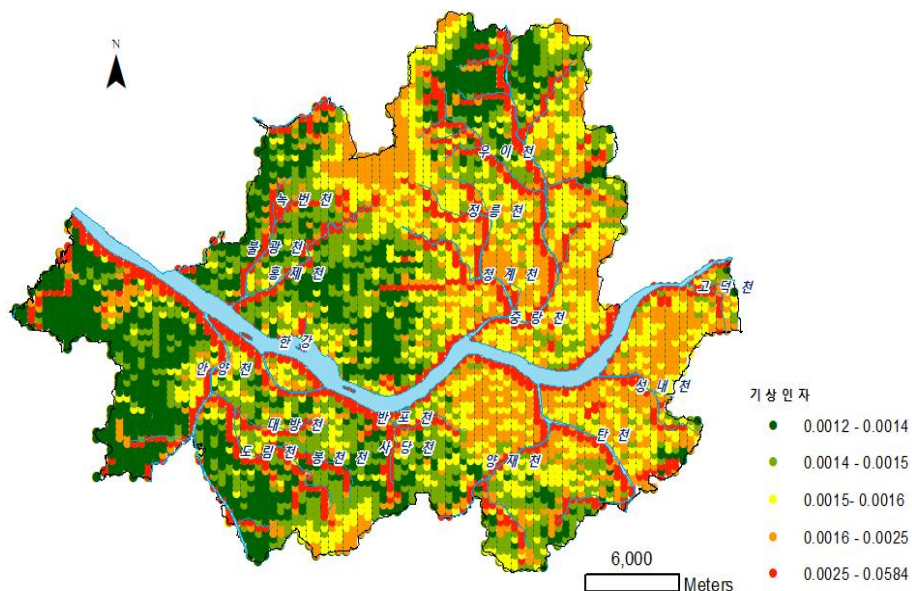


그림 37 기상인자에 대한 분포

그림37과 같이 높은 값이 나타나는 지역은 주로 하천망을 따라 나타나

고 있으며, 동부지역을 중심으로 집중되어 있음을 확인할 수 있었다. 안양천과 같은 하천주변과 여의도, 북한산에서 주로 나타났다. 기상인자의 분포를 통해 지난 5년간 서울시 강수량 양상이 동부지역, 하천변에 집중되어 있다. 기상청의 자료를 활용하여 2010년부터 2014년 강우 양상을 IDW분석을 통해 살펴보았을 때, 서울 동쪽에 강우가 집중되었음을 확인할 수 있다. 이는 기상인자의 분포와 서울시 평균 강수량과 비슷한 양상으로 나타났다는 것을 알 수 있다.

일반적으로 우리나라는 국지성 강우특성을 가지고 있다. 지난 5년간의 서울시 집중강우 지역과 집중강우로 인한 피해지역이 상당 부분이 일치하는 것을 확인 할 수 있었다. 기상인자의 분포를 통해 우리나라는 국지성 강우특성을 가지고 있으며 피해 지역이 상당부분 겹친다는 점에서 침수 영향을 주고 있음을 추측할 수 있다.

3) 유수인자의 분포

물의 흐름과 관련된 지형의 분포를 확인했을 때 그림38과 같다. 붉은 지점의 의미는 곡률의 볼록한 정도가 크고 지형특성지수가 높은 지역을 의미한다. 이러한 지점들은 주로 하천과 하천주변으로 도출되었다. 반면, 초록색 지점이 많이 나타나는 지점은 지형이 오목할 가능성이 크고 지형특성지수가 낮은 지역일 가능성이 크다. 초록색 지점이 두드러지게 나타난 지역들은 산간지역인 것으로 나타났다.

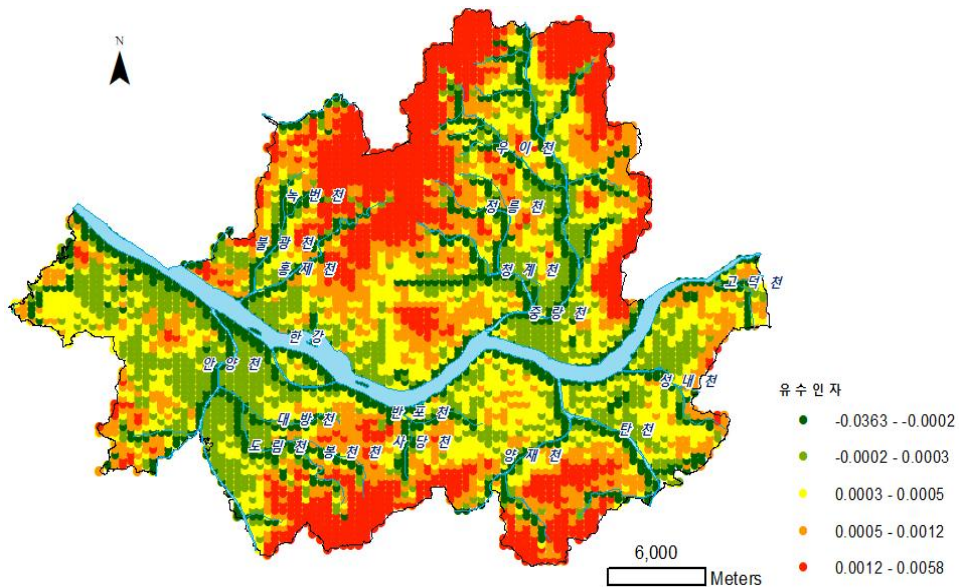


그림 38 유수인자의 분포

사면곡면률은 사면의 형태를 3차원적으로 보여주어 물의 흐름을 파악할 수 있게 한다. 지형특성지수(TCI)는 사면의 모양과 그 위에서 나타나는 물과 물질 흐름의 양을 간접적으로 추정할 값으로 물질이동잠재력을 추정하는 지수로 사용된다(박수진, 2004). 지형특성지수는 산지 사면에 따라 양의 값이 도출될 경향이 크다. 따라서 붉은색이 나타난 지역은 주로 산간지역에 분포되어있으며, 반대되는 지형을 가진 하천과 하천주변에 녹색이 분포되었다.

4) 유량인자에 대한 분포

물의 모이는 지형인자의 분포를 나타내면 그림39와 같다. 붉은 지점들은 습윤지수와 사면유역지수가 높은 지역을 의미한다. 유량인자의 영향이 가장 높게 나타난 지역들은 주로 서울시 외곽에 위치한 산간지역이나 하천변에 위치하고 있었다. 반면 낮은 값들이 나타난 지역은 시가지로 나타났다.

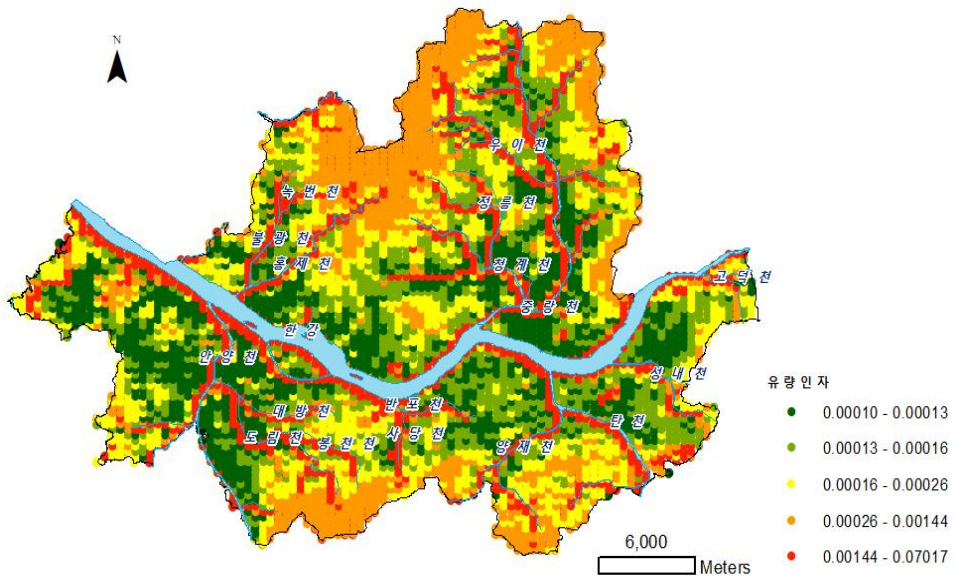


그림 39 유량인자의 분포

변수에 포함된 습윤 지수와 사면유역지수는 물이 흘러 모이는 지점을 알 수 있는 지표이기 때문에 홍수 분석에 있어 강우유출현상과 지형특성의 관계를 보여주는 척도로 활용된다(신상영, 2011). 사면유역지수와 습윤지수의 값이 높으면 토양수분량이 많다는 의미이며(남서정, 2011), 이는 침수의 가능성이 높아진다는 것을 의미한다.

그림39와 같이 유량인자는 하천에서 가장 많은 침수 영향을 받고 있음을 확인할 수 있다.

5)생태인자의 분포

생태인자의 분포를 살펴보면 그림40과 같이 나타낼 수 있다. 붉은 지점들은 하천과의 거리가 가깝고 식생율이 높은 지역을 의미한다. 가장 높은 분포가 나타난 지역들은 주로 산간지역이나 하천에 위치하고 있었다.

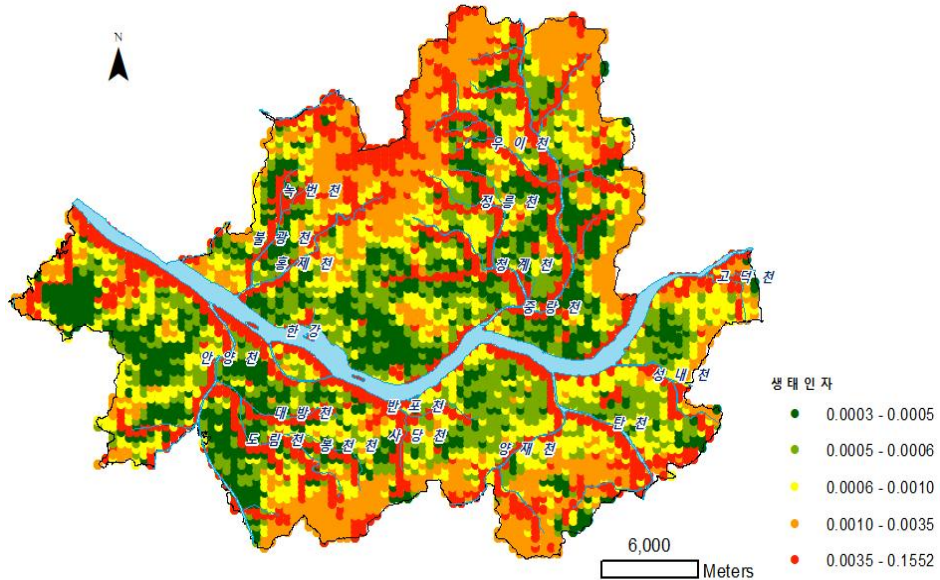


그림 40 자연인자의 분포

하천의 인접성인자는 서울시 하계망을 따라 높은 분포가 나타남을 볼 수 있었다. 이는 하천근처에 녹지율이 높거나 단순히 하천과의 거리가 짧아 이러한 분포가 나타났다고 추측할 수 있다.

종합해보면 주로 하천변에서 요인별 영향이 두드러졌다. 하천변은 지형적으로 저경사, 저지대인 곳이 많고 지형의 형태가 오목하여 물이 흘러 모이기 쉽다. 또한 녹지율이 낮고 불투수율이 높아, 침투성은 낮고 유출량이 증가 하여 침수가 쉽게 일어날 것으로 판단된다.

각 요인별로 주로 하천변에서 두드러지는 영향이 보였다는 결과는 기존의 여러 연구와 유사점이 있다. 침수는 주로 하천을 중심으로 범람하거나 하천 수위 상승으로 인해 하수도의 역류 등 범람에 의해 주로 발생한다(심우배 등, 2008)점에서 유사점이 있다. 생태인자 분포와 관련하여, 김지수 등(2013) 연구에 따르면 안양천, 중랑천, 성내천, 불광천 유역에 속한 지역들에서 녹지가 부족하며 홍수 민감도가 높게 평가된 바 있다.

유속인자 분포와 관련하여, 고태규·이원영(2012b)의 연구에서 중랑천, 성내천, 안양천 일대에서 시가지 개발로 인한 불투수율이 증가하고 있다는 점과 지형적으로 저지대가 많아 자연스럽게 범람하는 주요 범람원이 존재하였다고(고태규·이원영, 2012b) 밝힌바 있다. 도심뿐만 아니라 하천 주변에서도 불투수율이 높게 나왔다는 점과 수변이 낮은 지대로 도출된 결과 유사점이 있다.

4.3. 서울시 수해지에 대한 회귀분석

4.3.1. 회귀분석을 통한 침수 분석

앞선 연구에서는 서울시 침수피해 요인들에 대한 설명을 요인분석 통해 알아보았고 여기서 도출된 5개의 요인을 활용하여 서울시 침수 피해 요인들의 영향 정도를 살펴보았다. 이장에서는 서울시 내에 어떤 요인이 침수 피해에 주된 영향을 미치는지 알아보기 포아송 회귀분석을 시행하였다. 앞선 분석에서 도출된 5개의 잠재변수를 활용하여 회귀분석을 시행하였다. 회귀분석결과 모든 인자들이 통계적으로 유의성이 있는 것으로 나타났다.

표 5 잠재변수를 활용한 포아송 회귀분석 결과

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)	유의성
(Intercept)	1234.545	27.956	44.16	<2e-16	***
유속인자	-253.664	11.688	-21.7	<2e-16	***
기상인자	-158.008	6.486	-24.36	<2e-16	***
유수인자	-2197.67	65.925	-33.34	<2e-16	***
유량인자	-710.986	15.548	-45.73	<2e-16	***
생태인자	-240.935	13.731	-17.55	<2e-16	***

유의정도: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

다중회귀모형은 독립변수의 수를 최소화하면서 모형의 적합도가 높아야 한다. 각 인자들의 홍수피해의 영향력 알아보기 위해, 포아송 회귀분석을 토대로 변수 중요도를 알아보았다. 회귀모형 내에 가장 높은 중요도를 차지하고 있는 요인은 유수인자로 33.04%의 설명력을 가지고 있다. 다음으로 중요한 요인은 기상인자로 27.36%, 생태인자 13.25%의 설명력이 도출됐다. 개별 요인들은 요인분석 과정에서 여러 인자들과 묶이면서 그 영향력도 달라지는 것으로 나타났다(그림41).

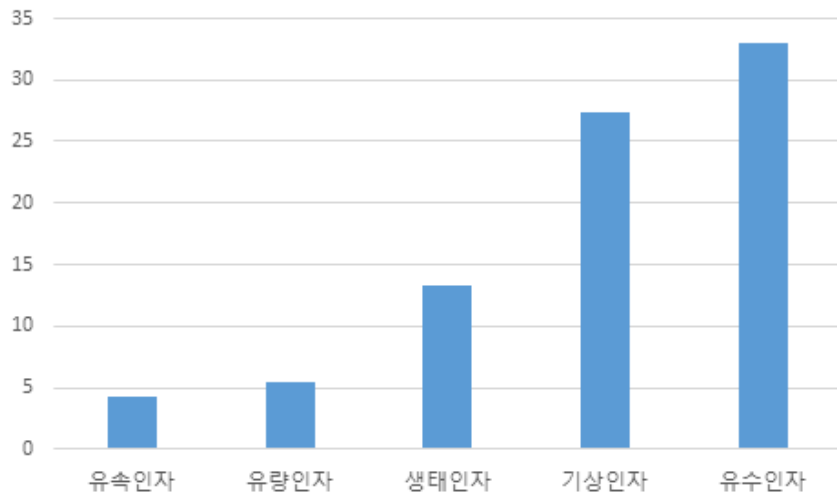


그림 41 회귀모형에서 각 변수의 중요도(x: 각 변수들 y: 변수 중요도)

침수피해를 주는 영향인자로써 크게 유수인자, 기상인자, 생태인자로 도출되었다. 종합해보면 강수량을 비롯해 지면에 물이 모이기 쉬운 지형에서 피해가 두드러진다고 추측 할 수 있다. 유수인자의 분포를 참고했을 때, 유수인자가 두드러지게 나타난 지역은 하천을 포함한 하천 주변으로 도출되었다.

이러한 결과는 침수피해가 주로 강우인자나 시가화 면적이 높고 불투수율이 높은 지역과 같은 인위적인 요인에 의해 피해가 두드러진다고(윤중석 등, 2013; 이현종 등, 2016; 김지수 등, 2013) 밝힌 여러 연구들과 다르게 나타났다. 반면, 기상인자와 하천의 인접한 곳에서 높은 홍수 취약성을 보인다는 점에서 본 연구와 유사성이 있다(강정은 · 이명진, 2012). 기존 연구에서 고려하지 않았던 자연지형적 요인들을 추가함으로써 서울시의 자연·지형적 특징을 확인할 수 있었으며, 영향인자들이 복합적인 상호작용을 이루어 침수피해를 미친다는 점을 확인하였다.

4.4. 침수 저감을 위한 정책적 시사점

앞선 장에서 지난 5년간 서울시의 침수 피해현황과 분석을 통해 원인을 확인할 수 있었다. 침수 영향인자를 살펴보고 주요 영향을 인자를 도출하였다. 이장에서는 앞선 분석결과들을 종합하여 결과를 살펴보고자 한다.

분석결과를 살펴보면, 수해에 영향을 미치는 요인은 크게 유속인자, 기상인자, 유수인자, 유량인자, 생태인자로 구분된다. 수해에 영향을 미치는 가장 큰 요인은 유수인자인 것으로 나타났다. 이는 물이 모이는 지형에서 일어나며 주로 하천변이나 하천일 가능성이 크다. 특히 안양천, 도림천, 탄천, 성내천, 중랑천과 청계천을 포함하고 있는 지역에서 주로 나타남을 확인할 수 있었다. 두 번째로 영향을 주는 인자는 기상인자로, 지난 5년간 동부지역에서 높은 강수량을 기록했다. 동부지역은 강남구, 성동구, 중구, 동대문구, 송파구, 강동구를 포함한다. 세 번째와 네 번째 영향인자는 생태인자와 유량인자로 나타났다. 이들 요인이 높은 지역은 하천을 포함하고 있는 지역으로, 거의 모든 자치구가 포함된다고 할 수 있다. 마지막으로 영향을 주는 인자는 유수인자로, 경사도와 고도가 낮고 불투수율이 높은 지역은 사당천과 반포천 일대, 양재천, 탄천, 성내천, 고덕천 일대로 나타났다.

이를 서울시에서 높은 밀도를 보였던 수해지들과 수해 영향인자 분포를 비교해 보면, 주로 유수인자 분포와 겹쳐지는 것을 알 수 있었다. 2010년부터 2014년 서울시에서 높은 밀도를 보였던 수해지는 양천구, 강서구, 관악구, 동작구이며, 이 지역들은 유수인자의 분포에 포함되어 있음을 확인할 수 있었다.

여러 연구에서 강수량이 주요 원인으로 밝혔으나 기상분포를 살펴보았을 때 동부지역에 집중되어 있었다. 이는 한강이남 지역에서도 서쪽에서 침수피해지가 밀집되어 있다는 점에서 강수량이 주요 원인이라고 보기 어렵다고 판단된다. 또한 침수의 주요원인으로 급격한 유출을 일으키는 급경사 지형을 가지고 있거나 높은 불투수율을 지적하기도 했다(정상희,

2003; Youn et al., 2016). 지난 5년간 서울시의 주요 수해지는 저지대인 경우를 많이 볼 수 있는데, 유속인자 분포를 통해 하천변이 낮은 지대임을 확인할 수 있었다. 또한 저지대와 유수인자의 분포가 겹친다는 점에서 주요 하천을 따라 기복이 크다는 것을 알 수 있었다. 이는 호우 시, 강우가 하천으로 모이기 쉽게 만들어 유출량 증가시켰을 것으로 보인다. 따라서 하천에서 침수피해가 많이 일어났던 것은 높은 시가화로, 높은 불투수율이 유출량을 증가 시켰을 것(고태규·이원영, 2012b)이라는 연구와 더불어 지형적 요인도 작용 했을 것으로 보인다.

앞선 분석을 통해 높은 밀도를 보였던 수해지를 포함한 서울시에서 지정한 주요 침수취약지역 주변⁸⁾에 27개(2016년 기준)의 빗물 저류조가 설치되어있으며 3개 더 설치되어질 예정이다(서울특별시, 2017). 지금까지 서울시는 시설적 요인의 해소를 중시하여 왔고 투자도 그 방면으로만 시행하였다(고태규, 2012). 수방대책은 크게 하수관거의 용량 증대, 빗물받이, 펌프장, 저류조와 같은 빗물시설 개선 및 증설, 역류방지시설 및 간이 펌프 보급과 같은 대책이 논의되고 있다(국회입법조사처, 2012). 서울시는 집중호우로 많은 침수가 발생할 때 마다 수방시설을 확충하고 있다. 2010년과 2011년 기록적인 폭우로 대규모 침수피해 이후 상습 침수 지역의 원인을 집중 분석하고 해소책을 마련하고 있다(서울특별시, 2015). 15년 신촌로터리 일대의 수해예방 사업 완료로 19년까지 34개 전 지역의 수해예방사업의 완료를 목표하고 있다(서울특별시, 2015). 이들 수해예방사업으로는 빗물 펌프장 빗물 저류조를 설치하는 등의 구조적 대책이 주를 이루고 있음을 알 수 있다. 이렇듯 서울시에서 많은 수방시설을 설치 해놓았기 때문에 구조적인 수방대책은 잘 이루어지고 있음을 확인할 수 있다. 하지만 기후변화로 인한 강우량의 증가와 지형적인 한계로 상습침수 지역의 침수원인을 근본적으로 치유하는데 많은 한계가 있을 것으로 판단된다. 한편, 빗물펌프장 및 빗물 저류조 등의 수방시설

8) 서울시에서 지정한 주요 침수 취약지역은 34개소로 이루어져 있다. 침수 규모 등에 따라 분류하여 지역별 맞춤 종합개선대책을 마련하고 관리해오고 있다.(서울시 보도자료, 2015)

의 설치 연혁이 짧아 이러한 시설들이 수해예방에 어느 정도의 효과를 주었는지 확인하기는 쉽지 않다. 따라서 서울시의 수방대책에 관한 연구 및 효과는 향후 연구 과제로 남겨놓고자 한다.

수해지의 토지이용도를 알아보기 위해 토지피복도의 변수 중요도 분석해보았다. 분석결과를 살펴보면, 주로 주택가에서 많이 일어났다(그림42). 이는 많은 주택가가 하천변에 위치하고 있음을 추측할 수 있다. 신상영(2011)의 연구에서 토지이용의 측면에서 서울시의 침수피해는 주거상업혼합지, 상업업무시설지, 교통시설지의 침수피해율이 상대적으로 높다는 점에서 본 연구와 유사점이 있다. 침수피해가 발생한 주택의 규모를 보면 대부분 하천변에 위치한 소규모 주택으로 나타났다(국토연구원, 2008). 이와 같은 결과는 침수에 취약할 수밖에 없는 지역을 개발함으로써 지형적 요인이 주요 원인이라 추측할 수 있다. 따라서 도시개발 시 침수 위험이 있는 지역에 대한 부적합한 개발을 피해야한다.

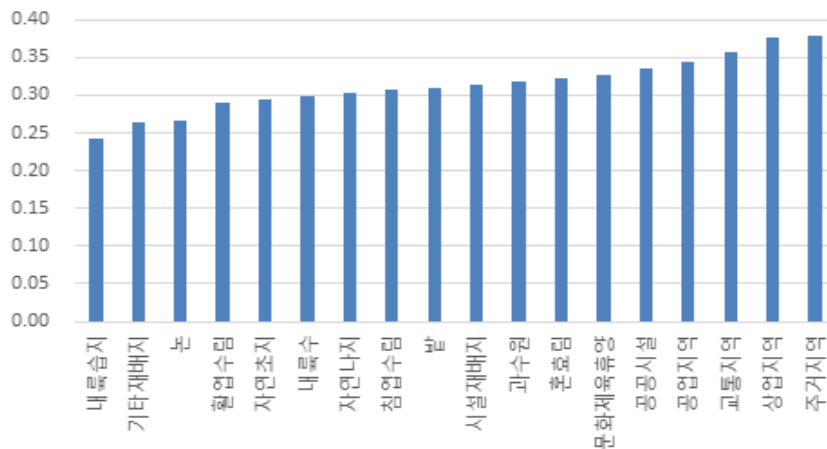


그림 42 토지피복도별 변수 중요도(x축:토지이용도, y축: 변수 중요도)

분석과 같이 자연적 요인으로 인한 침수의 피해가 예상되는 하천 부근이나 저지대는 지반고 상승, 배수 펌프장 시설 확충 등의 구조적인 대책뿐만 아니라 시가화용지로의 사용을 제한하고 인구가 밀집되지 않도록 토지이용계획을 수립해야한다.

공통적으로 침수피해는 하천주변에서 일어나거나, 영향을 받는다는 점에서 유역단위의 수해관리 정책이 효과적일 수 있음을 시사하고 있다. 따라서 유역단위의 수해관리 정책 관한 연구 및 효과는 향후 연구 과제로 남겨놓고자 한다.

5. 요약 및 결론

본 연구는 서울시를 대상으로 침수 피해에 영향을 미치는 요인들을 파악하여 이들이 침수 피해 발생에 미치는 영향관계를 파악하였다. 먼저 점패턴 분석을 통해 지난 5년간(2010-2014년) 일어났던 침수 피해 현황을 알아보았다. 두 번째로 포아송 회귀분석을 통해 서울의 수해 영향인들의 유의성을 확인하고 수해 영향요인을 전반적으로 살펴보았다. 이후 요인분석을 통해 침수영향 요인들의 특성을 파악하고 잠재변수를 추출하였으며, 추출된 잠재변수들의 분포를 확인하였다. 마지막으로 잠재변수를 활용하여 실제 침수피해 영향을 미쳤던 요인들을 알아보았다.

지난 5년간(2010-2014년) 서울시 침수 피해지역을 살펴보았을 때, 침수는 태풍보다는 호우에 의한 침수가 많았고, 2010년 가장 많은 침수 피해를 냈다. 서울 전역에 걸쳐 나타나고 있으며 지역적으로 편차가 컸다. 침수피해가 밀집되어 있는 지역이 연도별로 다르지만 주로 하천변에서 일어났음을 알 수 있었다. 자치구로 살펴보았을 때, 가장 많은 침수가 일어난 지역은 관악구 신림동 일대에 위치해 있다. 침수피해지역은 국지적으로 발생하며 공간적 상관성을 보인다. 세 지역 모두 주거지역에서 침수가 일어났다는 점, 침수 발생지점에 크고 작은 하천을 끼고 있거나 지형적 범람원(하천합류부 등)에서 침수가 일어났다.

침수피해에 영향을 미칠 수 있는 자연·환경적 요인들은 요인분석을 통해 추출되었다. 침수에 영향을 미칠 수 있는 요인들은 유속인자, 기상인자, 유량인자, 유수인자, 생태인자로 도출되었다. 이 요인들을 분포와 함께 살펴보면, 홍수피해가 크게 미치는 지역들은 지형의 굴곡이 크고 물이 흘러들어가 잘 모이는 지역일 가능성이 크다. 따라서 유역지역, 하천변에서 홍수피해가 클 것으로 추측된다.

요인분석으로 도출된 요인들을 활용한 회귀분석을 통해 서울시 침수피해에 영향을 미쳤던 주요 요인들을 알아보았다. 분석 결과, 유수인자, 기상인자, 생태인자 순으로 높은 중요도를 나타내고 있었다.

이러한 결과는 자연 지형적 요인에 영향을 받는 것으로 추측할 수 있다. 개별 인자와 잠재변수를 활용한 회귀분석 모든 분석결과에서 서울시의 침수피해는 주로 하천과 하천주변에서 영향을 받는 것으로 일치했다. 이러한 결과는 유역단위의 수해관리 정책이 효과적일 수 있음을 시사하고 있다. 수해의 영향 범위는 행정구역별로 나타나지 않으며 국지적으로 발생하기 때문에 수해방지에 있어 지역적 특성을 고려하여야 한다. 따라서 침수지역이 과거 어떠한 형태의 범람원이었는지 파악하고, 유역전체의 이해를 바탕으로 원인을 살피는 일이 필요하다. 또한 공간이 가지고 있는 자연지형을 이해하고 상습 침수지는 생태 공간으로 조성하는 등의 지속가능한 수해대책이 이루어져야 한다. 특히 하천의 상류와 하류의 관계를 파악하고 유역별 관리가 되어져야 하며 이에 대한 근거마련에 대한 연구와 적절한 수해 관리를 위한 적절한 유역단위 연구가 활발히 진행될 필요가 있다.

본 연구는 서울시의 다양한 자연환경적인 요인들을 분석하여 홍수피해 원인을 반영하는 요인들을 파악하는 연구라는 점에서 의의가 있다. 또한 도시홍수 피해지역의 효율적인 방재계획을 수립하기 위해 홍수피해 원인을 반영하는 기초자료를 제공한다는 점에서 의의가 있다. 한편, 도시 지역의 침수피해를 정확히 파악하기 위해 사회·경제적 특성에 대한 고려가 필요하다. 후속연구에서는 이러한 사회경제적 영향지표에 대한 데이터를 반영하여 도시지역 침수피해 요인에 대한 더욱 보완된 연구를 진행할 필요가 있다.

참 고 문 헌

- Abdellatif, M., Atherton, W., Alkhaddar, R., & Osman, Y. (2015). Flood risk assessment for urban water system in a changing climate using artificial neural network. *Natural Hazards*, 79(2), 1059 - 1077. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1892-6>
- Evans, I. S., & Cox, N. J. (1999). Relations between land surface properties: Altitude, slope and curvature. Lecture Notes in Earth Sciences (Vol. 78). <http://doi.org/10.1007/BFb0009718>
- Evans, I., & J. Cox, N. (2006). Relations between land surface properties: Altitude, slope and curvature. Lecture Notes in Earth Sciences, Berlin Springer Verlag. <http://doi.org/10.1007/BFb0009718>
- Gunderson, L. (2010). Ecological and Human Community Resilience to Natural Disasters. *Ecology and Society*, 15(2), 18. <https://doi.org/18>
- IPCC. (2014). Summary for Policymakers. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- Jongman, B., Kreibich, H., Apel, H., Barredo, J. I., Bates, P. D., Feyen, L., ... Ward, P. J. (2012). Comparative flood damage model assessment: Towards a European approach. *Natural Hazards and Earth System Science*, 12(12), 3733 - 3752. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-3733-2012>
- Jun, K.-J., & Yune, C.-Y. (2015). Analysis of Slope Hazard Triggering Factors through Field Investigation in Korea Over the Past Four Years. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 31(5), 47 - 58. <https://doi.org/10.7843/kgs.2015.31.5.47>
- Korea Meteorological Administration. (2012). *Climate Report for Korean Peninsula*.
- Kuhn, M. (2013, January 1). Caret: Classification and regression training. UK: R Package.
- Lee, B. J., Choi, S. M., Yoon, S. S., & Choi, Y. J. (2016). The Evaluation of TOPLATS Land Surface Model Application for Forecasting Flash Flood in mountainous areas. *Journal of Korea Water Resources Association*, 49(1), 19 - 28. <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2016.49.1.19>

- Park, S. J. (2014). Generality and Specificity of Landforms of the Korean Peninsula, and Its Sustainability. *Journal of the Korean Geographical Society*, 49(5), 656 - 674.
- Park, S. (2004). A Geomorphological Classification System to Characterize Ecological Processes over the Landscape. *Journal of The Korean Geographic Society*, 39(4), 495 - 513.
- Park, S. (2004). A Geomorphological Classification System to Characterize Ecological Processes over the Landscape. *Journal of The Korean Geographic Society*, 39(4), 495 - 513.
- Tate, E., Muñoz, C., & Suchan, J. (2015). Uncertainty and Sensitivity Analysis of the HAZUS-MH Flood Model. *Natural Hazards Review*, 16(3), 04014030.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)NH.1527-6996.0000167](https://doi.org/10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000167)
- Tingsanchali, T. (2012). Urban flood disaster management. *Procedia Engineering*, 32, 25 - 37.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1233>
- Youn, J. S., Kim, Y. M., Yim, K. H., Baek, J. I., & Ban, Y. U. (2016). C risisonomy Analyzing the Urban Socio-economic Factors that Affect the Damage Causes and the Consequences Before and After the Flood. *Crisisonomy*, 12(7), 53 - 62.
- 강정은 · 이명진. (2015). 인공신경망을 활용한 서울시 도시기반시설 침수위험지역 분석 Analysis of Urban Infrastructure Risk Areas to Flooding using Neural Network in Seoul. *한국지리정보학회지*, 35(4), 997 - 1006.
- 강현웅. (2015). 기후변화를 고려한 도시지역의 도시홍수 취약성 평가에 관한 연구. *서울시립대학교*.
- 강현철. (2013). A Guide on the Use of Factor Analysis in the Assessment of Construct Validity. *대한간호학회지*, 43(5), 587 - 594.
- 고태규. (2012a). 도시홍수 방재를 위한 도시계획 및 유역권계획에 관한 연구 도시홍수 방재를 위한 도시계획 및 유역권계획에 관한 연구. *수원대학교 대학원*.
- 고태규 · 이원영. (2012b). 서울시 수해사례로 본 유역권계획의 필요성. *도시정책연구*, 3(2), 57 - 72.
- 고태규 · 이원영. (2012c). 저지대 홍수피해 저감을 위한 도시계획기법 연구. *서울도시연구*, 13(4), 287 - 300.
- 곽한빈, 이우균, 이시영, 원명수, 구교상, 이병두, 이명보. (2010). 우리나라 산불발생의 원인별 공간적 특성 분석. *한국임학회지*, 99(3), 259 - 266.

- 기상청. (2016). 서울특별시 성동구 기후변화 상세 분석보고서. 서울시.
- 기상청. (2011). 장마백서 2011. 서울시
- 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC) 제5차 평가 종합보고서. (2014).
<https://doi.org/10.1360/N972014-00516>
- 김동실. (2008). 서울의 지형적 배경과 도시화 양상. 한국교원대학교 대학원.
- 김보경, 장대원, 장남, 양동민. (2011). 기후변화를 고려한 도시홍수 위험요인 도출. 한국위기관리논집, 7(1), 125 - 142.
- 김양수, 성장현, 이준호. (2014). 최근 우리나라 홍수특성 분석, 47(5), 35 - 40.
- 김영란 · 김진영. (2004). 서울시 침수피해 저감을 위한 우수저류시설 적용방안. 서울.
- 김영호. (2012). 공간데이터의 시공간적 평가방법에 대한 고찰. 한국지리학회지, 1(2), 193 - 204.
- 김우구. (2018). 홍수에 강한 국토관리를 위한 홍수지도의 역할. 대한토목학회지, 53(3), 101 - 106.
- 김윤중, 이석민, 김태화. (2002). 서울시 상습침수지역관리시스템 구축방안. 서울시.
- 김지수, 성효현, 최광용. (2013). 도시 홍수 취약성의 공간적 분포 - 서울 지역을 중심으로. 한국지역지리학회지, 19(4), 615 - 626.
- 김지수. (2013). 서울 도심 내 홍수취약성의 공간적 특성 분석. 이화여자대학교 대학원.
- 남서정. (2011). 저산지 곡부 습지의 지형적 특성. 지리학회지, (57), 1 - 19.
- 문종욱. (2014). 도시지역의 침수방지를 위한 홍수방어 시스템 구축에 관한 사례연구. 한양대학교 공학대학원.
- 박무중, 박민규, 송영석. (2011). Analysis of Spatially Distributed Risk for Regional Disaster Management: 1. Hazard and Exposure. *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, 11(4), 189 - 199.
- 박민규, 송영석, 김상단, 박무중. (2012). 수해취약성인자를 이용한 고위험 도시침수지역의 평가기법에 대한 연구. 한국방재학회논문집, 12(2), 245 - 253.
- 박수진. (2004). 생태환경 특성 파악을 위한 지형분류기법의 개발. 대한지리학회, 39(4), 495 - 513.

- 박성천, 노경범, 이용희, 양동현. (2011). 지식천유역 침수실적 조사 및 침수예상지도 작성. 한국수자원학회, 297 - 301.
- 박한나 · 송재민. (2015). 회복탄력성 비용지수-2015. 대한국토·도시계획학회지 “국토계획”, 50(8), 95 - 113.
- 배재현. (2012). 기후변화에 따른 도시홍수와 방재 대책. 1-4. 국회입법조사처
- 서울연구원. Retrieved from <https://www.si.re.kr/>
- 서울특별시. (2015). 강남역 “상습침수” 방지 위한 3대 대책 발표. Retrieved from <https://opengov.seoul.go.kr/mediahub/4294581>
- 서울특별시. (2015). 서울시, 3년간 12개 침수취약지역 수해 예방사업 완료. Retrieved from <https://opengov.seoul.go.kr/press/7132807>
- 성장현, 백희정, 강현석, 김영오. (2012). 서울 지역의 미래 홍수취약도 평가. 한국습지학회지, 14(3), 341 - 352.
- 소방방재청. (2012). 재해연보 2011. 서울시.
- 송봉근, 이택순, 박경훈. (2014). GIS 기반의 도시지역 침수 취약성 평가. 한국지리정보학회지보, 17(4), 129 - 143. <https://doi.org/10.11108/kagis.2014.17.4.129>
- 신상영. (2011). 토지이용특성과 침수피해지역 간의 관계 연구. 서울시정개발연구원.
- 신상영 · 박찬열. (2014). 토지이용 특성과 침수피해면적 간의 관계 분석 : 서울시를 사례로. 국토연구, 81, 3 - 20.
- 신승환. (2015). 국지성 호우에 의한 산사태 지형재해연구. 한국교원대학교 교육대학원.
- 심우배, 왕광익, 이범현, 이문원. (2008). 재해에 안전한 도시조성을 위한 방재도시계획 수립방안 연구. 경기도 안양시.
- 심준석, 김지숙, 이성호. (2014). 지리가중회귀모델을 이용한 도시홍수 피해지역의 지역적 공간특성 분석. 환경영향평가, 23(1), 39 - 50.
- 오재호. (2007). 지구온난화에 따른 한국에서 자연재해 발생 전망. 한국위기관리논집, 3(2), 82 - 94.
- 우리나라 도시침수피해 특성과 정책과제. (2008, July). 국토연구원, 1 - 7.
- 이민우. (2013). 우리나라 지역별 홍수피해특성을 고려한 홍수피해 취약성 지수 개발. 한양대학교.
- 이상은, 김창현, 박태선, 김미은, 김슬예, 이태삼, 김진현. (2016). 도시침수지역 및 영향권 분석을 통한 재난안전 정책지원

- 시스템구현 (Vol D141212).
- 이승호 · 이경미. (2007). 강원도 산지지역의 자연재해 분포 특성. *대한지리학회지*, 43(6), 843 - 857.
- 이은걸. (1997). 한국 태풍재해의 공간분포와 발생요인에 관한 연구. *건국대학교 대학원*.
- 이자원. (2010). 우리나라 기후변화와 관련된 재해에 대한 적응기법 개발 동향 연구. *국토지리학회*, 44(4), 635~648.
- 이현중, 류성현, 원상호, 조은주, 김승옥, 조기훈. (2016). 침수피해 영향인자 분석을 통한 호우침수위험도 예측 모델 연구. *한국방재학회논문집*, 16(3), 39 - 45.
- 임화진. (2009). *K-means* 군집기법을 이용한 한강유역의 확률강우량 산정. *연세대학교 공학대학원*.
- 자연재난 구호 및 복구비용 부담기준 등에 관한 규정 (2011).
- 정관용. (2016). 홍수피해의 공간적 분포와 토지이용 변화와의 관계. *국토지리학회지*, 50(3), 389 - 400.
- 정상희. (2003). 도시하천유역의 수해 특성과 관련요인에 대한 공간적 분포 연구. *이화여자대학교 대학원*.
- 조운원, 최형욱, 최수영, 조명희. (2014). 수변구조물 재해 위험에 대응하기 위한 피해 평가 인벤토리 개념 설계. *한국지리정보학회지*, 17(1), 144 - 158.
- 채여라. (2016). 대도시 지역의 극한 홍수로 인한 복합영향 메커니즘 분석.
- 최시중, 강성규, 한성중, 이동률. (2011). 집중호우에 의한 도심 내수 침수피해조사 - 서울특별시 강남일대를 중심으로. *한국수자원학회*, 44(10), 36 - 40.
- 최충익. (2004). 수도권 도시지역 자연재해 유발요인에 관한 실증연구. *한국지역개발학회지*, 12116(4), 23 - 49.
- 최충익. (2013a). 포아송 분포를 활용한 지역 위험도 분석과 함의. *Korea Planning Association*, 48(5), 319 - 331. Retrieved (으)로부터 <http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE02282264>
- 최충익. (2013b). 현대 서울의 재난 · 재해 발생 특성에 관한 역사적 연구. *한국지역개발학회지*, 25(1), 159 - 182.
- 한국 기후변화 평가보고서2014 (기후변화 및 적응). (2015). 환경부, 국립환경과학원 (Vol 1). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Abstract

Spatial Distribution and Cause Identification of Flood-affected Areas in Seoul City

Jisoo Park

Geography

The Graduate School

Seoul National University

The purpose of this study is to investigate the spatial and environmental factors affecting flood damage in the city of Seoul during the period of 2010 to 2014. This research employed factor analysis to investigate the characteristic of each variable in relation to flood damage and to identify potential areas that are vulnerable to flood. Five factors were extracted, their spatial distribution observed, and verified whether they were influential factors in flood damage. Following this analysis, the main factors of influence were derived to be water flow, meteorological and ecological factors. Then using Poisson regression, the variable importance of these factors on flood damage was analyzed. The result suggests that geomorphic factor related to water flow(including curvature and terrain characterization index) most prominent in flood damage. Area with high water flow impact are likely to have bigger curves in the terrain and conducive for water convergence. According to analysis of spatial distribution, these areas are

normally located near rivers and streams, which exist in various areas throughout Seoul. Therefore, it is necessary to secure drainage and water flow infrastructure in these areas. Further studies need to be conducted analyzing the relationship between watershed and rivers for efficient management of each watershed.

keywords : Urban Flood, Flood damage, Factor analysis, Spatial distribution, Poisson regression, Seoul city